MODELAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Autoria:

Sérgio Teixeira Coelho, Dália Loureiro e Helena Alegre

FICHA TÉCNICA

Título:

MODELAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Autoria:

Sérgio Teixeira Coelho, Dália Loureiro, Helena Alegre

Edição:

Instituto Regulador de Águas e Resíduos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Agradecimentos:

A elaboração do manual contou ainda com a colaboração do Eng.º Paulo Praça (LNEC), e com contribuições, críticas e comentários do Dr. José Menaia (LNEC), da Eng.ª Paula Vieira (LNEC), da Eng.ª Maria do Céu Almeida (LNEC), da Eng.ª Rita Isidro (C.M. Barreiro) e dos participantes no programa INSSAA (Iniciativa Nacional para a Simulação de Sistemas de Abastecimento de Água).

Data:

Fevereiro de 2006

ISBN:

Depósito legal:

PREFÁCIO DO IRAR

O IRAR, enquanto regulador das entidades gestoras concessionárias de serviços de águas e resíduos em Portugal, tem procurado obter sinergias através de parcerias com as instituições técnicas e científicas mais relevantes do sector. Nesse sentido, foi assinado um protocolo de cooperação técnica e científica formalizando a colaboração com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil no sentido de aproveitar as potencialidades de ambas as partes com vista a desenvolver métodos e instrumentos de apoio à regulação.

No âmbito desse protocolo, que engloba a realização de estudos, de guias técnicos e de acções de formação, foi previsto o apoio do LNEC ao IRAR na elaboração e edição conjunta de manuais de simulação hidráulica e de qualidade da água de sistemas de abastecimento de água, para apoio à exploração das entidades prestadoras desses serviços.

Na verdade, e apesar de o uso de modelos de simulação para apoio à gestão de sistemas de abastecimento de água ser uma prática generalizada nos países mais desenvolvidos, em Portugal a sua utilização em regime de rotina ainda não se encontra tão vulgarizada quanto desejável. Estes instrumentos podem no entanto contribuir significativamente para a melhoria da qualidade de serviço no sector que, no que às concessões diz respeito, passou a ser objecto de um procedimento de avaliação anual tendo por base um conjunto de indicadores de desempenho, integrado no modelo de regulação do sector. Podem ser de grande utilidade no apoio às actividades de planeamento, projecto, operação e manutenção dos sistemas, permitindo um conhecimento mais aprofundado do funcionamento dos mesmos para diversos cenários possíveis, correntes ou excepcionais.

O IRAR, de acordo com o disposto na alínea l) do artigo 11.º do Decreto-Lei n.º 362/98, de 18 de Novembro, com as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 151/2002, de 23 de Maio, tem responsabilidades na sensibilização das entidades gestoras e dos autarcas em geral para as questões da qualidade na concepção, execução, gestão e exploração dos sistemas multimunicipais e municipais. Por outro lado, o LNEC, no seu papel de Laboratório de Estado a quem cabe promover a melhoria de qualidade das actividades no domínio da engenharia, tem vindo a desenvolver ao longo das últimas décadas trabalhos relevantes de investigação e desenvolvimento na área da simulação hidráulica e de qualidade da água de sistemas de distribuição.

O resultado é a presente publicação, intitulada “Guia Técnico 4 – Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água”, editada conjuntamente pelo IRAR e pelo LNEC e inserida na Série “Guias Técnicos”, que constitui assim um excelente exemplo de colaboração e criação de sinergias entre entidades de perfil complementar.

Esta edição deve ser vista com mais uma contribuição do IRAR para uma melhor protecção dos interesses dos utilizadores, com optimização dos preços *versus* qualidade dos serviços (eficácia e eficiência), uma maior salvaguarda da viabilidade económica dos operadores regulados e dos seus legítimos interesses, e a protecção dos aspectos ambientais associados a esta actividade.

O Conselho Directivo

Jaime Melo Baptista
Dulce Álvaro Pássaro
Rui Ferreira dos Santos

PREFÁCIO DO LNEC

A simulação matemática dos sistemas de abastecimento de água é hoje em dia uma ferramenta indispensável aos serviços de água, para apoio a uma gestão técnica racional. O campo de aplicação é variado, sendo um auxiliar das actividades de planeamento, de projecto, de operação e de manutenção. Destacam-se o apoio ao dimensionamento de novas redes, aos programas de reabilitação, ao licenciamento de novas ligações, ao controlo de perdas de água, ao controlo da qualidade da água nas redes ou à gestão optimizada de energia.

Em Portugal, o desenvolvimento e a aplicação de modelos matemáticos de sistemas de distribuição de água iniciou-se na década de 80, com o modelo da rede de Almada, elaborado em 1981 pelo LNEC. Depois de alguns anos em que a actividade realizada se centrou essencialmente no ambiente científico e académico, as empresas de consultoria começaram a ganhar espaço de mercado na prestação deste tipo de serviços para as entidades gestoras. Numa fase inicial os requisitos computacionais eram consideráveis – os modelos eram utilizados em computadores centrais, inacessíveis à generalidade das entidades gestoras portuguesas – e os programas eram pouco amigáveis, requerendo conhecimentos de programação.

A situação actual é muito diferente, existindo uma grande acessibilidade ao *hardware* e *software* de base para o desenvolvimento deste tipo de modelos. De facto, qualquer computador pessoal dos nossos dias tem capacidade para acomodar um modelo de uma rede de dimensões e complexidade consideráveis. Por outro lado, a par do *software* comercial, existe *software* de desenvolvimento de modelos que tem grande qualidade e está disponível gratuitamente, também em português. É o caso do programa EPANET, na versão elaborada e disponibilizada pelo LNEC, cujo manual de utilizador se encontra também publicado na série Guias Técnicos do IRAR.

Esta evolução, contudo, só recentemente se começa a fazer sentir no seio das entidades gestoras. De facto, a realidade demonstra que só é possível tirar real partido da modelação matemática quando existe uma estrutura interna à entidade gestora que permita criar, actualizar e explorar os modelos de uma forma fiável e eficiente. Os modelos de “chave na mão”, desenvolvidos por terceiros, tendem a ser sistematicamente abandonados após períodos de vida útil curtos.

Pelo contrário, a internalização do conhecimento pelas entidades gestoras e o estabelecimento de procedimentos bem definidos e rotinados está a demonstrar ser uma via de grande sucesso, impulsionadora de inovação tecnológica em muitos outros domínios da gestão. Verifica-se que o desenvolvimento de modelos de simulação dos sistemas pode e deve ser um bom pretexto para integrar a informação arquivada nos diversos sistemas de informação eventualmente existentes (sistemas de informação geográfica, de gestão de clientes e facturação, de telegestão,

de apoio à manutenção, etc.) e melhorar a qualidade dos dados disponíveis. O projecto intitulado Iniciativa Nacional para a Simulação de Sistemas de Abastecimento de Água (INSAA, 2003-2006), promovido pelo LNEC e com a participação de nove entidades gestoras nacionais, tem constituído, assim o cremos, um excelente exemplo desta abordagem.

O presente Guia pretende contribuir para que o exemplo das entidades participantes na INSAA se multiplique. Incorpora conhecimentos acumulados no LNEC ao longo de quase 30 anos de actividade neste domínio. Para além das matérias tradicionalmente tratadas em bibliografia estrangeira congénere, aborda muitos dos problemas surgidos nas aplicações em que o LNEC interveio, e recomenda soluções. Estrutura e formaliza cada fase de desenvolvimento de um modelo de simulação, na perspectiva de que se trata de um instrumento de trabalho dinâmico, que só é útil enquanto estiver actualizado, e que só se mantém actualizado enquanto os procedimentos respectivos forem claros e simples de implementar. Não se trata de um manual de utilizador de um programa, mas sim de um instrumento de apoio ao estabelecimento de uma estrutura organizacional adequada às funções de criação, manutenção e exploração de modelos de simulação.

A publicação deste Guia insere-se no âmbito do protocolo de cooperação entre o LNEC e o IRAR.

Carlos Matias Ramos (Presidente do LNEC)
Rafaela Matos (Directora do Departamento de Hidráulica e Ambiente)
Helena Alegre (Chefe do Núcleo de Engenharia Sanitária)

ÍNDICE GERAL

ÍNDICES DETALHADOS

ÍNDICE DO TEXTO

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE QUADROS

ABREVIATURAS

Sigla	Significado
CAD	Projecto (ou desenho) auxiliado por computador (do inglês *Computer-Aided Design*).
EG	Entidade gestora de um sistema de abastecimento de água.
LIMS	Sistema de gestão da informação laboratorial (do inglês *Laboratory Information Management System*).
SCADA	Sistema de telegestão e aquisição de dados (do inglês *Supervisory Control And Data Acquisition*).
SIG	Sistema de informação geográfica.
SPA	Simulação em período alargado.
ZMC	Zona de medição e controlo.

TERMINOLOGIA UTILIZADA EM PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO

O quadro abaixo contém nomenclatura utilizada na generalidade dos programas de simulação cujas versões originais estão em língua inglesa. Nestes programas, são frequentemente utilizadas siglas em inglês para designar os componentes das redes, tais como os diferentes tipos de válvulas. Por essa razão, é importante a familiarização com a nomenclatura abaixo descrita. Embora no presente no texto se utilize normalmente a terminologia e as siglas em português, empregam-se as siglas em inglês sempre que se refiram a opções de simulação ou do *software* de simulação.

Designação em português	Designação em inglês	Significado
aberto	*open*	Estado de uma conduta, bomba ou válvula.
fechado	*closed*	Estado de uma conduta, bomba ou válvula.
parâmetro de controlo	*setting*	Regulação da velocidade numa bomba ou parâmetro de controlo de uma válvula.
RNF	*reservoir*	Reservatório de nível fixo (reservatório de capacidade ilimitada e nível de água fixado *a priori*).
RNV	*tank*	Reservatório de nível variável (reservatório de capacidade limitada e geometria conhecida).
VA	*PSV*	Válvula de alívio.
VB	*TCV*	Válvula de borboleta.
VR	*CV*	Válvula de retenção.
VRC	*FCV*	Válvula reguladora de caudal.
VRP	*PRV*	Válvula redutora de pressão.

PARTE I – Introdução à modelação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objectivo

Este Guia tem por objectivo apresentar o tema da modelação de sistemas de abastecimento de água e descrever métodos para o seu correcto desenvolvimento e aplicação na análise dos sistemas e no apoio à tomada de decisão nos diversos aspectos ligados à gestão técnica daqueles sistemas.

O Guia destina-se primordialmente aos profissionais da indústria da água envolvidos no planeamento, projecto, operação, manutenção e reabilitação dos sistemas, e foi concebido tendo em vista o desenvolvimento de modelos no seio das entidades que gerem os próprios sistemas. No entanto, poderá igualmente ser útil a consultores e projectistas, a docentes, investigadores e estudantes de engenharia civil, ambiental, urbanística e de recursos hídricos, e a todos os potenciais utilizadores deste tipo de modelos.

1.2 Motivação

Em Portugal e em muitos outros países, à medida que as taxas de cobertura das infra-estruturas de abastecimento de água se vão aproximando dos seus limites possíveis, assiste-se a uma evolução da fase da construção dos sistemas para a fase da sua gestão. O mercado e a indústria do abastecimento de água vão-se organizando de acordo com parâmetros de eficiência e eficácia. Os problemas que se colocam aos técnicos das entidades gestoras, aos consultores e aos projectistas vão evoluindo para uma procura de cada vez maior racionalidade. Os investimentos são realizados com maior cuidado e melhor planeamento, e é verificado e avaliado o seu retorno efectivo. A tecnologia é, por outro lado, cada vez mais acessível, e vista como uma opção incontornável para a racionalização dos investimentos.

Entre nós, a modelação de sistemas de abastecimento de água permaneceu, até muito recentemente, no domínio das técnicas empregues quase exclusivamente por académicos e investigadores para a exploração de problemas teóricos ou aplicações experimentais. A sua utilização efectiva na indústria da água tem sido reduzida, descontando o seu uso na verificação – muitas vezes apenas formal – de soluções de projecto.

Para além da tradicional relutância – hoje em dia em clara mudança – em investir em soluções tecnológicas vistas como *acessórias*, sobretudo enquanto as principais questões se colocaram em torno do problema premente de fazer chegar o serviço ao consumidor, as razões para a pouca implantação, no passado, deste tipo de ferramentas prendem-se com diversos factores:

- a necessidade de alguma especialização técnica para uma correcta abordagem ao desenvolvimento de modelos;
- a dificuldade em gerar os dados necessários para construir e manter um modelo, a partir da informação disponível, por esta ser insuficiente, se encontrar dispersa ou não possuir a qualidade pretendida;
- o facto de a manutenção dos modelos exigir o estabelecimento de procedimentos sistemáticos e a afectação específica de recursos humanos, sem os quais um modelo rapidamente se torna obsoleto.

Até recentemente, eram igualmente factores determinantes os custos do equipamento e do *software*. Actualmente, pode dizer-se que nenhum desses aspectos é realmente impeditivo.

O desenvolvimento de modelos por especialistas, exteriormente à entidade gestora, não se revelou uma solução sustentável. Embora responda com maior ou menor eficácia aos dois primeiros aspectos acima mencionados, acaba sistematicamente por descurar o terceiro, agravando-o frequentemente pelo facto de os futuros utilizadores do modelo não terem acompanhado o seu desenvolvimento. A entidade gestora não fica de posse completa do *know-how* específico que só se adquire com as tomadas de decisão inerentes à construção do próprio modelo, e este rapidamente se desactualiza e deixa de ser usado. Tem sido esta a realidade dominante em Portugal.

No entanto, a situação em muitas entidades gestoras tem sofrido uma evolução muito positiva, como se referiu anteriormente. Acompanhando uma progressiva organização dos serviços no sentido da procura de uma maior eficácia, o advento de formas mais organizadas e eficazes de suporte da informação cadastral e operacional, como os sistemas de informação geográfica (SIG) ou os sistemas de telegestão, entre outros, tem permitido facilitar o acesso aos dados e melhorar a sua qualidade e cobertura. Por outro lado, tem igualmente contribuído para aumentar a

disponibilidade para investir em tecnologia, e ajudado a criar nas entidades gestoras um corpo técnico mais diversificado e versátil.

O surgimento recente de versões em português de alguns dos mais modernos programas de modelação, e a disseminação de *software* de livre distribuição, veio igualmente contribuir para tornar esta ferramenta acessível a uma comunidade técnica cada vez mais alargada, e ajudar assim à sua difusão.

A intenção deste Guia, à semelhança de outros que têm sido publicados em países onde a utilização de modelos assume há mais tempo um lugar de destaque na engenharia de abastecimento de água, é contribuir para que as modernas ferramentas computacionais de modelação passem a pertencer ao quotidiano dos profissionais ligados ao abastecimento de água.

Para além dos benefícios directos associados à análise dos sistemas e ao suporte à decisão em problemas de engenharia, a experiência tem demonstrado que o correcto desenvolvimento e utilização de modelos potenciam melhorias na qualidade geral da informação disponível sobre os sistemas, no conhecimento da infra-estrutura, e na articulação dos diversos sectores técnicos da entidade gestora.

No sentido mais lato, espera-se igualmente contribuir para uma maior utilização de sistemas de informação e instrumentos computacionais no apoio às tarefas ligadas à gestão técnica dos sistemas.

1.3 Forma de apresentação

O Guia procura apresentar a modelação e análise de sistemas de abastecimento de água de um ponto de vista essencialmente prático, através de métodos concretos para a sua aplicação e utilização rotineira. O recurso a formalismos matemáticos só é utilizado no texto principal quando absolutamente necessário. Procurou-se deferir para os anexos a fundamentação teórica das técnicas utilizadas – excepto onde se tornou indispensável para explicar determinado método ou técnica – sobretudo em relação a temas da hidráulica clássica, que se considera estarem já amplamente cobertos pelas publicações disponíveis.

Nos aspectos ligados ao *software* de simulação, o texto utiliza uma abordagem aplicável à generalidade dos programas disponíveis no mercado. Onde se tornou necessário ilustrar com

exemplos concretos, recorreu-se ao programa Epanet 2.0, um *standard* mundial disponível gratuitamente no domínio público, traduzido para português[1] e largamente difundido no meio nacional.

1.4 Conteúdo

Este Guia está organizado em três partes:

- Parte I – Introdução à modelação
- Parte II – Desenvolvimento de modelos
- Parte III – Modelação e análise de sistemas

A Parte I, que inclui a presente introdução, destina-se a uma apresentação geral do tema da modelação de sistemas de abastecimento de água. O Capítulo 2 explica em que consiste um modelo de simulação, que resultados produz e para que podem ser utilizados, como se relaciona com os restantes sistemas de informação de uma entidade gestora, como deve ser construído e quais os requisitos para o seu desenvolvimento.

A leitura da Parte I não requer conhecimentos avançados de engenharia hidráulica para uma compreensão geral das matérias apresentadas. No entanto, são fornecidos os elementos necessários para um aprofundamento da fundamentação teórica dos modelos e dos métodos para a sua resolução, seja nos textos anexos, seja na bibliografia citada.

A Parte II é dedicada ao desenvolvimento dos modelos, apresentando as diversas etapas do processo de forma metodológica. Foi escrita com o objectivo de proporcionar aos técnicos responsáveis pela actividade de modelação, no seio de uma entidade gestora ou de um gabinete de engenharia, a base metodológica e a informação necessária para o completo desenvolvimento e manutenção de modelos. A sua leitura pressupõe um conhecimento competente das noções básicas de engenharia hidráulica, sobretudo no que diz respeito à hidráulica dos escoamentos em pressão.

---

[1] A versão em língua portuguesa pode ser obtida a partir de: `www.dha.lnec.pt/nes/epanet`

O Capítulo 0 descreve a fase preliminar de planeamento do esforço de modelação, incluindo: os aspectos estratégicos ligados à definição de objectivos e de usos futuros do modelo, a macro-sectorização dos sistemas e a selecção dos modelos a desenvolver, e o tipo, grau de detalhe e especificação dos modelos; as opções básicas de software; a informação necessária para a construção dos modelos; as convenções a adoptar antes de ser dado início ao desenvolvimento; e a gestão do desenvolvimento do modelo, com a definição da equipa de desenvolvimento e do gestor do modelo.

O Capítulo 4 aborda em detalhe a informação que é necessário compilar e organizar para a construção de um modelo, desde os dados que descrevem os componentes físicos do sistema – condutas, válvulas, reservatórios, bombas, etc. – à descrição das solicitações – os consumos – e à especificação do modo de operação do sistema a modelar.

O Capítulo 5 aborda o problema da aferição ou calibração do modelo construído, por ajuste dos seus parâmetros, para que os resultados obtidos se aproximem o melhor possível das medições efectuadas no sistema a modelar. São abordadas as questões relativas à monitorização e teste dos sistemas, de forma a obter os valores reais das variáveis de estado que se pretende ver reproduzidas pelo modelo, e são descritos os principais procedimentos de calibração, com particular atenção conferida às possíveis fontes de erro na construção de um modelo.

A Parte III apresenta as principais aplicações dos modelos de simulação no âmbito do planeamento, projecto, operação e manutenção de sistemas de abastecimento de água. O Capítulo 6 aborda as aplicações mais comuns, com especial incidência para o apoio à decisão no tipo de problemas que é mais frequente encontrar na gestão quotidiana dos sistemas. O Capítulo 7 apresenta técnicas e métodos complementares, que partem da utilização de modelos, por vezes em conjunto com outros algoritmos ou ferramentas, para a realização de análises específicas como a avaliação do desempenho técnico.

Os fundamentos da teoria de modelação de sistemas de abastecimento de água são fornecidos em detalhe no Anexo A, em complemento às noções introduzidos na Parte I. O Anexo B apresenta uma metodologia para obtenção da geometria da rede no Epanet 2.0 a partir do cadastro informatizado, um assunto introduzido na Parte II. O Anexo C apresenta exemplos ilustrativos

das Fichas Técnicas de modelação, também introduzidas na Parte II do texto.

2 MODELAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.1 Em que consiste um modelo de simulação

As redes de distribuição são tipicamente infra-estruturas enterradas, de cujos componentes apenas uma reduzida parte é fisicamente inspeccionável. Por outro lado, a capacidade efectiva de monitorização do estado dos sistemas, através de medições de pressão, de caudal ou de concentração de parâmetros de qualidade da água, por exemplo, é desproporcionadamente insuficiente no tempo e no espaço, face à complexidade das redes, ao número de pontos de consumo e à variabilidade deste.

O comportamento de um sistema, e as suas deficiências, não são por isso facilmente perceptíveis de forma directa. Muitas vezes os utilizadores ou a entidade gestora apercebem-se de que algo não está bem através de sintomas exteriores tais como a falta de pressão, a falta de água, elevados volumes de perdas, surgimento de água à superfície do solo, coloração ou turvação da água. A caracterização e o diagnóstico detalhado da situação por inspecção directa são demasiado onerosos, o que leva à necessidade de instrumentos de apoio baseados em modelação e análise.

Também no caso de sistemas por construir, o custo elevado da infra-estrutura e a variabilidade das condições a prever faz com que o próprio processo de planeamento e projecto se revista de uma forte necessidade de apuramento e verificação das soluções preconizadas pela experiência do projectista.

Os modelos de simulação são ferramentas que permitem, com uma margem de erro estimável, analisar e prever o comportamento hidráulico e de parâmetros de qualidade da água do sistema, a partir das características dos seus componentes, da sua forma de operação e dos consumos solicitados. Os modelos permitem assim a rápida e eficaz realização de análises de sensibilidade e a simulação dos cenários mais variados, com suficiente aproximação, sem ser necessário interferir com o sistema em causa ou arriscá-lo a modos de operação desconhecidos.

Os modelos de simulação são os instrumentos computacionais mais utilizados e consagrados no campo do projecto e do diagnóstico de funcionamento de sistemas de transporte e

distribuição de água, constituindo um complemento importante ao discernimento e experiência dos técnicos envolvidos.

A simulação do comportamento do sistema pode ser utilizada para prever a sua resposta face a gamas alargadas de condições operacionais e ambientais. Os problemas podem assim ser antecipados e as soluções avaliadas antes de os investimentos serem realizados.

O modelo de simulação hidráulica de um sistema de abastecimento de água é composto por:

(i) um conjunto de dados descritivos das características físicas do sistema, das suas solicitações – os consumos – e das suas condições operacionais;

(ii) um conjunto de equações matemáticas (na sua maioria não-lineares) que reproduzem o comportamento hidráulico dos componentes individuais e do sistema como um todo, expressas em termos das principais variáveis de estado – por exemplo, o caudal nas condutas ou a pressão nos pontos notáveis – e instanciadas pelos dados descritivos mencionados em (i); e

(iii) os algoritmos numéricos necessários para a resolução desse conjunto de equações matemáticas.

Um modelo de qualidade da água acrescenta, ao modelo hidráulico, equações que traduzem o transporte, mistura e transformação da concentração de substâncias que se comportem como estando dissolvidas na água.

Os resultados de um modelo são expressos em termos das variáveis de estado, e reproduzem – com um nível de precisão que pode ser estimado – o comportamento do sistema real, com o objectivo de analisar situações tipificadas, existentes ou projectadas.

Um modelo pode ser formulado e resolvido de forma inteiramente manual, sem recurso a aplicações computacionais. O desenvolvimento dos métodos numéricos de resolução dos sistemas de equações envolvidos nas formulações utilizadas antecedeu em várias décadas o advento dos computadores. No entanto, dada a complexidade e inerente morosidade dos cálculos, foi com a implementação informática que os modelos deste tipo passaram a constituir uma ferramenta viável e útil para a simulação efectiva dos sistemas em gamas alargadas de condições operacionais.

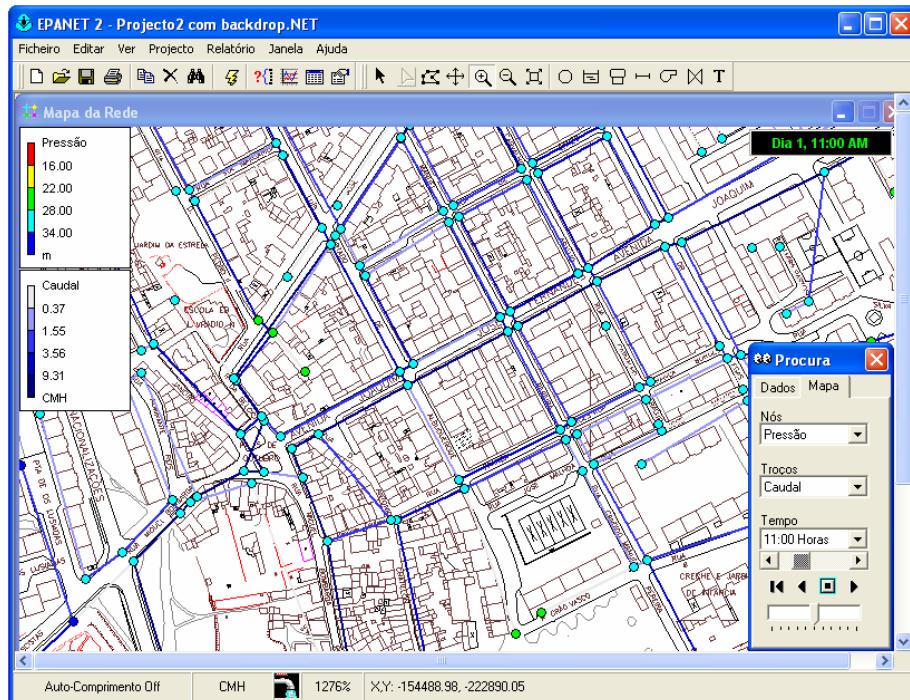
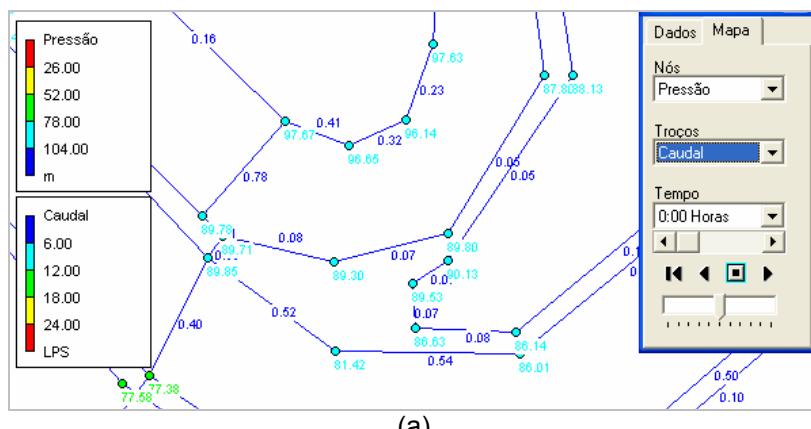
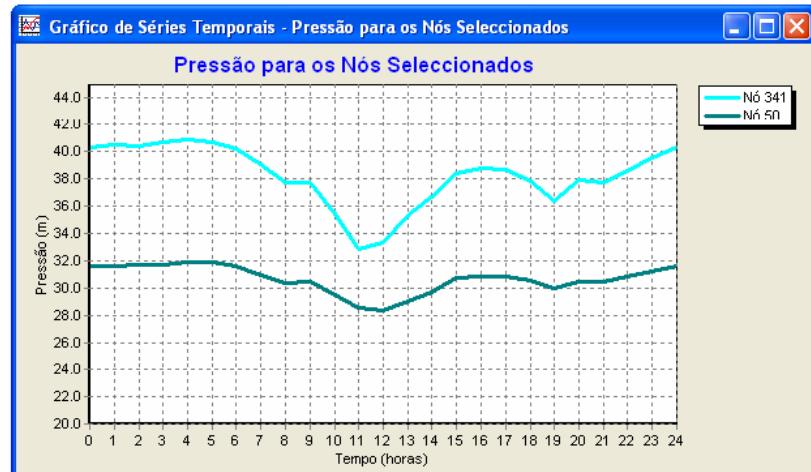



Figura 2.1 – Interface gráfica típica de um simulador moderno, com representação do traçado da rede sobre cartografia digital.

Constituindo muito embora um suporte ideal para o modelo, deve notar-se que o programa de computador só materializa o modelo quando alimentado pelos dados descritos em (i), referentes ao sistema específico que se pretenda modelar.

Os modernos programas de simulação permitem construir graficamente, de modo interactivo, uma descrição completa da infra-estrutura física – condutas, válvulas, reservatórios, instalações elevatórias e outros componentes – e da sua topologia e topografia (Figura 2.1). Apresentam interfaces gráficas cada vez mais semelhantes às do *software* de SIG ou de cadastro informatizado, com os quais, aliás, comunicam de forma já bastante eficaz.

A descrição da infra-estrutura, num modelo, é limitada à topologia e aos parâmetros necessários para a modelação. Pelo contrário, um SIG é projectado para georeferenciar[2] e armazenar toda a informação descritiva existente sobre cada componente do sistema, de modo exaustivo, mas sem objectivos de análise funcional da rede. Um SIG pode conter, assim, uma parte substancial da informação necessária para a modelação, que poderá exportar para o *software* de simulação.

Para além da descrição do sistema físico, um programa de simulação possibilita ao utilizador a construção de uma descrição detalhada das solicitações – os consumos de água – e dos modos de operação, incluindo as condições impostas por níveis de reservatórios limítrofes ou ligações a outros sistemas.

Na posse desta informação, o *software* de simulação oferece a possibilidade de calcular o equilíbrio hidráulico do sistema, exprimindo de forma numérica e gráfica os valores das variáveis de estado, tais como:

- a pressão e a cota piezométrica nos pontos notáveis da rede (por exemplo, nos pontos de consumo), incluindo o nível de água nos reservatórios;
- a velocidade de escoamento, a perda de carga e o caudal nas condutas, válvulas e bombas;
- o estado de abertura/fecho ou a regulação de válvulas e bombas;

A maioria dos programas permite igualmente calcular o movimento, mistura e transformação de parâmetros físico-químicos ou bioquímicos relativos a substâncias dissolvidas na água, permitindo assim o cálculo de grandezas como a concentração em qualquer ponto da rede, o tempo de percurso da água entre dois pontos, ou (em sistemas com mais de uma origem de água) a percentagem da água consumida em cada ponto da rede que provém de determinado ponto de abastecimento. É comum designar essa função por *modelação de qualidade da água*, vista como um complemento da modelação de parâmetros hidráulicos, ou *modelação hidráulica*.

---

[2] Ou seja, referenciar cada componente num sistema de coordenadas geográficas.

(a)

(b)

Figura 2.2 – Exemplos de resultados de uma simulação, em formato gráfico: (a) caudal nos troços e pressão nos nós para determinado momento no tempo (0:00 horas), em toda a rede; (b) pressão em dois nós da rede (50 e 341), para a totalidade da duração de uma simulação em período alargado.

A simulação pode ser efectuada tanto para um determinado momento no tempo – habitualmente designada por simulação estática – equivalente a uma única *fotografia* do sistema (Figura 2.2a), como para um dado período de tempo, a intervalos pré-definidos – simulação em período alargado[3], ou SPA – que poderá ser comparada a um *filme* constituído por uma sequência de fotografias, separadas no tempo por um passo temporal pré-definido (Figura 2.2b).

A simulação em período alargado é, assim, realizada através de uma sucessão de simulações estáticas, sendo as condições de fronteira representadas pelos níveis nos reservatórios (e os volumes de armazenamento que lhes correspondem) ajustadas na transição entre cada dois momentos sucessivos.

Tabela da Rede - Troços às 11:00 Horas

ID do Troço	Caudal CMH	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km
Tubagem 29	-4.86	0.27	1.21
Tubagem 30	-5.39	0.30	1.46
Tubagem 31	-1.20	0.12	0.37
Tubagem 32	-2.06	0.20	1.00
Tubagem 33	-5.82	0.32	1.69
Tubagem 34	-10.20	0.56	4.76
Tubagem 35	-2.25	0.22	1.18
Tubagem 36	-2.95	0.29	1.94
Tubagem 37	-3.80	0.21	0.76
Tubagem 38	0.12	0.01	0.00
Tubagem 39	0.50	0.07	0.18
Tubagem 40	0.25	0.04	0.05

(a)

Tabela de Séries Temporais - Troço 30

Tempo Horas	Caudal CMH	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km
0:00	-2.37	0.13	0.32
1:00	-2.13	0.12	0.26
2:00	-2.30	0.13	0.30
3:00	-1.99	0.11	0.23
4:00	-2.09	0.12	0.25
5:00	-2.29	0.13	0.30
6:00	-2.39	0.13	0.32
7:00	-2.93	0.16	0.47
8:00	-3.55	0.20	0.67
9:00	-3.59	0.20	0.69
10:00	-4.42	0.24	1.01
11:00	-5.39	0.30	1.46

(b)

Figura 2.3 – Exemplos de resultados de uma simulação, em formato numérico tabular: (a) velocidade, perda de carga e caudal, em todas as condutas da rede, para determinado momento no tempo (11:00 horas);

---

[3] É frequente este tipo de simulação ser designado por *simulação dinâmica*, por oposição à simulação estática. A designação não é rigorosa, uma vez que se trata da simulação de regimes permanentes, executada em sucessivos momentos de um determinado período de tempo, sem recurso ao cálculo dos regimes dinâmicos. O termo “simulação em período alargado” é uma tradução da designação em inglês “*extended-period simulation*” (EPS), actualmente bastante difundida.

(b) as mesmas grandezas, numa determinada conduta (Troço 30), para a totalidade da duração de uma simulação em período alargado.

Os resultados podem ser obtidos em formato gráfico, como na Figura 2.2, ou em formato numérico, igualmente para uma *fotografia* do sistema inteiro em determinado instante (Figura 2.3a) ou para um *filme* relativo a um determinado componente (conduta, nó, válvula, reservatório, bomba) para o período simulado (Figura 2.3b).

2.2 Para que serve um modelo: aplicações da simulação

Os modelos de simulação têm múltiplas aplicações nos domínios do planeamento, projecto, operação, manutenção e reabilitação de sistemas de transporte e distribuição de água.

De entre as utilizações mais comuns poderão destacar-se:

- o dimensionamento dos sistemas, através da procura das melhores topologias, da escolha de diâmetros e materiais para as condutas e restantes componentes, e do dimensionamento de reservatórios e instalações elevatórias;
- o apoio à elaboração de planos de desenvolvimento estratégico, com recurso à simulação das grandes opções, em escala não detalhada, mas com projecções no tempo, sobretudo das solicitações (consumos);
- a simulação de problemas e cenários de operação corrente, como sejam consumos de ponta sazonal, gestão dos níveis em sistemas com múltiplos reservatórios de serviço, ou situações de emergência como falhas em grupos elevatórios ou o combate a incêndios;
- o treino de operadores em sistemas de operação complexa, evitando que a aprendizagem incorra em riscos directos para o sistema e para os consumidores;
- o controlo e optimização de parâmetros de qualidade da água, como por exemplo a manutenção de um residual adequado de cloro, a localização de equipamentos de re-cloragem, o controlo de tempos de percurso ou a escolha de pontos de amostragem;
- a reabilitação de sistemas deficientes, e a programação das intervenções com minimização de impacto no consumidor;

- a redução e/ou recuperação da energia de bombeamento;
- o apoio à modularização das redes, pela análise da viabilidade e impacto da criação dos sectores;
- o controlo de perdas de água, por exemplo através de programas de redução de pressões de serviço.

A utilização dos modelos foi evoluindo com o tempo, desde o aparecimento dos primeiros programas para simulação estática nas décadas de sessenta e setenta, funcionando em computadores centrais e utilizadas sobretudo para fins de investigação (Martin e Peters, 1963; Wood e Charles, 1972; Epp e Fowler, 1972) até às primeiras aplicações ao dimensionamento de sistemas (Alperovits e Shamir, 1977, entre outros).

A disseminação comercial do *software* começou a verificar-se em escala significativa na década de oitenta, estimulada pelo aparecimento dos computadores pessoais. Foi igualmente no final dos anos oitenta que se deu o aparecimento dos primeiros programas comerciais para simulação em período alargado e de aplicações complementares para previsão de consumos e optimização de bombeamentos.

Num inquérito efectuado em 1992 a 915 entidades gestoras norte-americanas (Cesario, 1995), cerca de 86% declararam já possuir modelos de sistemas de abastecimento (embora sem especificar o nível de detalhe ou de exigência); destas, 63% afirmaram utilizar os modelos mensalmente ou mesmo semanalmente, para uma grande variedade de objectivos. Na mesma altura, o Reino Unido apresentava já uma utilização efectiva generalizada de modelos de simulação, fruto de uma capacidade técnica bastante desenvolvida, como consequência de uma maior consolidação da indústria da água naquele país].

É expectável que os níveis de utilização efectiva tenham aumentado na última década, uma vez que foi precisamente neste período que se assistiu a um incremento importante da qualidade e diversidade das ferramentas disponíveis no mercado – nomeadamente com a oferta de soluções integradas com os SIG e com os sistemas de telegestão – bem como dos serviços de consultoria propostos neste domínio.

Saliente-se que, de entre as aplicações mais citadas no inquérito acima referido, preponderavam os objectivos de engenharia (projecto de construção e reabilitação), seguidos das utilizações ligadas ao planeamento estratégico, figurando o apoio ao controlo operacional em terceiro lugar.

Um grupo de nove entidades gestoras portuguesas, envolvidas no desenvolvimento de modelos de simulação para os respectivos sistemas de abastecimento, no âmbito da *Iniciativa Nacional para a Simulação de Sistemas de Abastecimento de Água*[4] citou como prioritários, na fase de planeamento do desenvolvimento de modelos, os seguintes objectivos:

- controlo de perdas;
- aumento do conhecimento do comportamento da rede e apoio ao controlo operacional;
- controlo de qualidade da água (definição de programas de recolha de amostras; investigação de tempos de percurso);
- apoio à concessão de licenciamentos (avaliação do respectivo impacto);
- apoio ao planeamento dos sistemas, incluindo a sua sectorização.

2.3 Fundamentos da modelação matemática

2.3.1 Representação da rede

O modelo de um sistema de abastecimento de água parte de uma representação esquemática da rede (Figura 2.4), em que existe um conjunto de nós, cuja posição é definida através de coordenadas planimétricas e de uma cota, ligados por troços que representam os componentes físicos: condutas, válvulas e bombas. As entradas e saídas de caudal da rede (respectivamente, abastecimento e consumo) têm lugar nos nós.

Os troços são usualmente definidos por um nó *de montante* e um nó *de jusante*. Se nas bombas e nalguns tipos de válvula tal corresponde a uma restrição física – o escoamento verifica-se obrigatoriamente em determinado sentido – no que diz respeito às condutas esta ordem é arbitrariamente definida, *a priori*, podendo não se reflectir no sentido de escoamento ditado pelo equilíbrio

---

[4] Programa para apoio ao desenvolvimento de modelos de simulação por entidades gestoras, coordenado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (http://www.dha.lnec.pt/nes/iniciativa).

hidráulico. A definição inicial de nó de montante e nó de jusante meramente estabelece um sentido de referência: o caudal será afectado de um sinal negativo se ocorrer em sentido oposto.

Para além da sua função topológica, os nós são utilizados para identificar todos os pontos notáveis da rede, como as intersecções de condutas, mudanças de material ou de diâmetro da conduta, pontos de consumo ou de abastecimento, pontos altos e pontos baixos, pontos de medição, fronteiras de sectores de rede e outros.

Os nós são portanto elementos convencionais, e podem ser inseridos arbitrariamente, não tendo necessariamente uma correspondência física *per se*. Possuem, no entanto, dois atributos essenciais ao formalismo de modelação: a cota altimétrica e a possibilidade de um caudal externo de entrada (consumo) ou de saída (abastecimento).

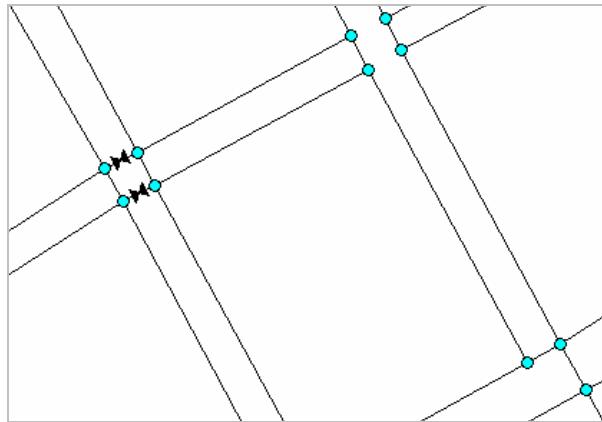



Figura 2.4 – Representação esquemática da rede: *troços* ligados entre si nos vértices por intermédio de *nós*.

Os reservatórios são modelados como nós especiais da rede: pontos onde são impostas condições de fronteira relativamente à superfície piezométrica, a que podem estar ou não associadas relações entre a altura de água e um volume de água armazenado.

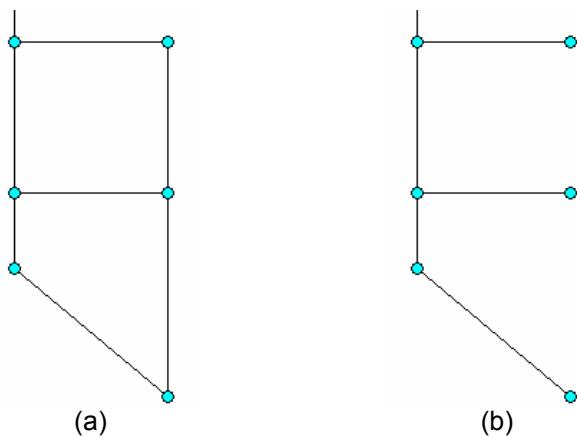



Figura 2.5 – Sector de rede emalhado (a) e sector de rede ramificado (b).

As válvulas e as bombas – órgãos cuja acção, respectivamente, reduz ou aumenta a carga hidráulica associada ao escoamento – são habitualmente simuladas como troços, unindo nós[5].

Um conceito importante na representação utilizada – e na topologia e comportamento dos próprios sistemas – é a *malha* de rede: um conjunto de troços sucessivamente ligados entre si para que o nó de jusante do último troço é o nó de montante do primeiro troço. As redes dizem-se *emalhadas* se incluem malhas, e *ramificadas* se não as incluem (Figura 2.5).

---

[5] Este é o caso da maioria dos simuladores presentes no mercado. No entanto, existem simuladores que representam bombas e válvulas, não como troços, mas como nós, com o mesmo efeito sobre o escoamento: ganho ou perda de energia.

No Quadro 2.1 resume-se a forma como os vários elementos da rede são modelados, assim como a sua função no modelo.

Quadro 2.1 – Elementos utilizados para a modelação de uma rede.

Elemento	Tipo	Função
Nó	Nó	Ponto de ligação entre dois ou mais troços; saída (consumo) ou entrada (abastecimento) de água no sistema.
Reservatório de nível fixo (RNF)	Nó	Armazenamento a partir de um nível de água fixo e com uma capacidade de ilimitada; fornece ou recebe água do sistema.
Reservatório de nível variável (RNV)	Nó	Armazenamento com capacidade de limitada e nível de água variável, em função do balanço dos caudais entrado e saído; fornece ou recebe água do sistema.
Conduta	Troço	Transporte de água entre dois nós.
Bomba	Troço	Fornecimento de energia ao escoamento entre dois nós, aumentando a sua carga hidráulica.
Válvula de controlo	Troço	Regulação do caudal ou da carga hidráulica entre dois nós.

O modelo de um sistema de distribuição de água não tem necessariamente de incluir todos os seus componentes. Um sistema completo pode frequentemente consistir de um número tão elevado de condutas e válvulas que torna pouco prática a sua consideração exaustiva num modelo, sobretudo porque a geração e manutenção de informação suficiente sobre todos os seus componentes pode tornar-se uma tarefa irrealizável.

A simplificação da rede é tradicionalmente empregue em modelação para reduzir o tamanho de um modelo. É conseguida através da não-consideração de condutas abaixo de determinado diâmetro, pela agregação de grupos de consumidores ou pela substituição de partes da rede por tubagens hidraulicamente equivalentes, desde que não sejam alteradas as principais malhas da rede (caso existam). Uma simplificação cuidadosa produz frequentemente resultados hidraulicamente equivalentes ao modelo completo.

No entanto, os actuais programas de simulação tendem progressivamente a apresentar capacidades quase ilimitadas no que diz respeito à dimensão das redes a modelar[6], no que são acompanhados por uma disponibilidade cada vez maior do potencial computacional do equipamento informático comum.

Estes dois aspectos, associados ao facto de a modelação de qualidade da água, actualmente uma das aplicações mais comuns da simulação, necessitar de modelos completos (incluindo todas as condutas) para garantir a validade da representação, faz com que a prática moderna tenda a evitar as simplificações hidráulicas e geométricas.

Com efeito, a não consideração de condutas hidraulicamente pouco importantes pode traduzir-se por erros consideráveis no que diz respeito à propagação de concentrações de parâmetros de qualidade da água: uma conduta com pequena capacidade de transporte e pouco relevante do ponto de vista hidráulico pode, apesar disso, transmitir uma concentração significativa do parâmetro a modelar.

2.3.2 Formulação do problema

Apresenta-se seguidamente uma breve revisão dos principais postulados matemáticos da técnica de modelação, cujos princípios, formulação e limitações constituem a pedra basilar da análise de sistemas de transporte e distribuição de água. Para um maior aprofundamento das noções apresentadas, poderá consultar-se, entre outros, Mays *e tal.* (2004), Walski *et al.* (2003), Rossman (2002), Cesario (1995), Alegre (1990) ou Baptista (1983).

No Anexo A apresenta-se uma descrição circunstanciada da formulação do problema, bem como da sua resolução numérica – tanto do ponto de vista hidráulico como do comportamento de parâmetros de qualidade da água – exemplificando-se com o Método do Gradiente e com a sua implementação no caso do simulador Epanet 2.0.

---

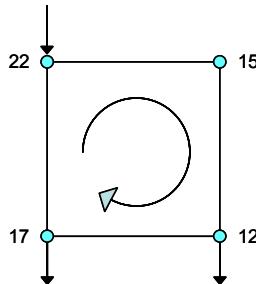
[6] Embora alguns dos programas disponíveis no mercado sejam comercializados a preços dependentes do número de troços ou de nós modeláveis, onerando significativamente as versões de maior capacidade.

2.3.2.1 Modelação do comportamento hidráulico

No formalismo acima descrito, um sistema de abastecimento de água é essencialmente descrito pela sua topologia e pelas características hidráulicas de cada um dos seus componentes. Os troços são descritos pelos parâmetros das leis hidráulicas que lhes estão associadas, o que no caso das condutas consiste no comprimento, diâmetro e coeficiente de rugosidade hidráulica.

Dada a descrição física de um sistema em si, um modelo hidráulico consiste de:

(i) O conjunto de variáveis de estado necessárias para descrever o estado hidráulico corrente da rede. Na modelação de redes de águas sob pressão utilizam-se habitualmente a pressão ou cota piezométrica nos nós, e o caudal, velocidade de escoamento e perda de carga nos troços.

(ii) O conjunto de equações características relacionando as variáveis de estado para cada componente da rede, tais como as equações não-lineares que relacionam caudal com perda de carga (diferença entre a carga hidráulica no nó inicial e no nó final do troço) num troço de tubagem, válvula, bomba ou qualquer outro componente (formulações completas para aquelas relações poderão ser encontradas, p.ex., em Walski *et al.*, 2003, Lencastre, 1996, ou Quintela, 1981).

Uma das equações mais usadas para modelar o escoamento sob pressão em tubagens é a aproximação de Hazen-Williams, em que q é o caudal, C_{HW} o coeficiente de perda de carga, d o diâmetro, *h* a perda de carga unitária e β um factor de conversão (vide referências acima citadas):

$$q = \beta\, C_{HW}\, d^{2.63}\, h^{0.54} \tag{1}$$

(iii) Um conjunto de equações de rede, que agregam as equações características de todos os componentes numa descrição matemática completa da rede. As equações nodais de equilíbrio de massas exprimem a igualdade da soma dos caudais entrados e da soma dos caudais saídos em cada nó. Para o nó genérico *i*:

$$\sum_{k=0}^{U^i} q_{ki} - \sum_{j=0}^{D^i} q_{ij} = 0; \forall i \in N \tag{2}$$

em que q_{ij} é o caudal [7] de i para j, e U^i e D^i respectivamente os conjuntos de nós de montante e de jusante em relação a i.

Figura 2.6 – Perda de carga total em torno de uma malha.

(iv) Um outro conjunto de equações de rede traduz o equilíbrio energético em redor de cada malha, estabelecendo que a soma total das perdas de carga nos troços que compõem uma malha, contabilizadas num mesmo sentido de rotação em torno da malha (Figura 2.6), é zero:

$$\sum_{l=1}^{NL^r} \Delta H_l = 0; \forall r \in NLP \qquad (3)$$

em que ΔH_l é a perda de carga no troço l, NL^r o número de troços na malha r e NLP o número de malhas na rede.

Os dois conjuntos de equações (2) e (3) – um escrito inteiramente em termos de variáveis de caudal no troço, e o outro inteiramente em termos de pressões nos nós – são relacionáveis através das equações características dos componentes da rede, (1).

---

[7] Na notação para caudais aqui seguida, q_{ij} denota caudal no troço *ij*, com o subscrito 0 designando um super-consumidor/ super-origem, de tal forma que os troços fictícios *i*0 e 0*i* possam ser associados respectivamente com o consumo e o abastecimento no nó *i*. Deste modo, q_{i0}, q_{0i} são respectivamente os caudais de consumo e de abastecimento no nó *i*.

O sistema global de equações assim formado pode ser formulado em termos de nós, em termos de malhas, ou simultaneamente em termos de nós e de malhas. A solução do modelo fornece o conjunto completo de caudais nos troços e de pressões nos nós, constituindo a chamada solução hidráulica da rede.

Existem várias técnicas para a resolução do sistema de equações que compõe o modelo, das quais se destacam:

- o método de Hardy-Cross, com as equações das malhas (Hardy-Cross, 1936);
- o método de Newton-Raphson, com as equações das malhas (Martin e Peters, 1963, Epp e Fowler, 1972);
- o Método da Teoria Linear, utilizando ambos os conjuntos de equações (Wood e Charles, 1972);
- o método da Minimização de Energia (Collins *et al.*, 1978);
- variações da formulação nodal de Newton-Raphson, tais como o Método Híbrido (Carpentier *et al.*, 1985) ou o Método do Gradiente Modificado (Todini e Pilati, 1987).

Os vários métodos são discutidos e comparados, por exemplo, em Nielsen (1989), Germanopoulos (1988) ou Salgado *et al.* (1987).

Os modelos que aplicam a formulação clássica, acima descrita, assumem que o consumo especificado em cada nó se verifica independentemente do valor da pressão. Várias implementações permitem mesmo que o consumo se verifique para pressões inferiores a zero (embora habitualmente sejam emitidas mensagens de aviso nestes casos), uma vez que a situação pode ser causada por uma especificação incorrecta das condições de fronteira no abastecimento – cota da superfície livre de um reservatório ou altura de elevação de uma bomba – facilmente rectificável pelo modelador.

Existem modelos que oferecem a possibilidade de simular os consumos como uma função da pressão disponível, implementando em cada nó de consumo uma relação de dependência entre os dois parâmetros, do tipo da expressão que rege o escoamento por um orifício:

$$q_{i0} = \mathrm{k}\,(h_i - h_0)^{\theta} \quad (4)$$

sendo q_{i0} o consumo no nó i, h_i a pressão disponível a montante do orifício, h_0 a pressão a jusante do orifício (neste caso, assumida

como nula), k um coeficiente que depende da forma do orifício, e θ um expoente que assume o valor 0.5. Esta formulação é designada por *pressure-driven* (regida pela pressão) por oposição à formulação clássica, também designada por *demand-driven* (regida pela procura).

A aplicação em sistemas de abastecimento de água deste tipo de modelos destina-se frequentemente a procurar uma descrição mais eficaz da parcela do consumo que representa o caudal de perdas nas condutas (consultar, entre outros: Araújo *et al.*, 2003; Tanyimboh, 2002; Martinez *et al.*, 1999, Germanopoulos, 1988). Dados experimentais têm demonstrado que o expoente θ pode assumir valores até 1.18, sendo o coeficiente k dependente da forma de exprimir o caudal de perda em função do comprimento das condutas ligadas ao nó (Jowitt e Xu, 1990; Vairavamoorthy e Lumbers,1998).

Vários dos simuladores actualmente disponíveis, como o Epanet 2.0, têm a capacidade de representar dispositivos emissores (do tipo dos aspersores de rega) que podem ser utilizados para aquele fim. No entanto, não é ainda comum a utilização desta possibilidade em modelação corrente, pelo desconhecimento das relações efectivas de dependência entre o consumo ou o caudal de perdas e a pressão, para o caso concreto do sistema a modelar.

2.3.2.2 Modelação de parâmetros de qualidade da água

Os modelos do comportamento de parâmetros de qualidade da água que actualmente integram a generalidade dos programas de modelação de sistemas de abastecimento de água simulam o movimento e transformação de substâncias físico-químicas ou bioquímicas que possam considerar-se como estando em solução na água (Coelho, 1997).

Os modelos simulam três processos fundamentais. Dois desses processos são devidos ao movimento da água, e consequentemente à hidráulica do sistema: o transporte ou advecção ao longo das condutas, e a mistura nos nós de junção. O terceiro processo, que afecta substâncias não-conservativas, é o efeito conjunto de transformação inerente ao contacto e permanência dessa substância na água que circula no sistema, e que se pode dever a reacções com ela própria, com a água e com outras substâncias nela presentes, e com o material que compõe as paredes de condutas e órgãos de armazenamento. O processo

de transformação pode resultar em decaimento, crescimento ou transformação noutra substância.

Outro processo que poderia ser tomado em consideração é a mistura longitudinal ao longo da direcção do escoamento. No entanto, este processo é normalmente considerado desprezável relativamente ao transporte longitudinal, dados os perfis transversais de velocidades típicos do escoamento de água em pressão e a grande diferença entre as ordens de grandeza do comprimento e do diâmetro de uma conduta (Grayman *et al.*, 1988, Liou and Kroon, 1987, 1988).

O processo de advecção é fundamentalmente modelado pelas equações que representam o equilíbrio hidráulico, anteriormente apresentadas, e mais concretamente pelos valores do caudal ou da velocidade de escoamento em cada troço.

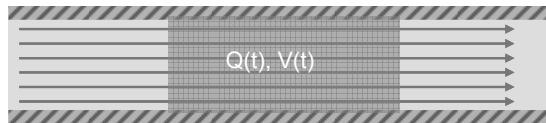



Figura 2.7 – Advecção ou transporte com o escoamento.

A modelação do processo de mistura nos nós, que tem lugar em qualquer nó com entrada de mais do que um caudal, contando com um eventual caudal de abastecimento exterior, assume que a mistura é completa e instantânea, respeitando o princípio de conservação da massa.

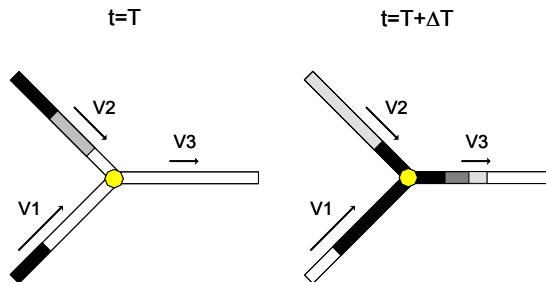



Figura 2.8 – Mistura completa nos nós.

Dado um conjunto de duas ou mais condutas que contribuem para um determinado nó e que transportam concentrações distintas de um dado parâmetro, a concentração desse parâmetro em todas as condutas que partem do nó é igual, e corresponde à mistura completa das concentrações de entrada na proporção dos respectivos caudais (Figura 2.8).

Para um nó genérico *i,* com U^i nós de montante e D^i nós de jusante:

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=0}^{U^i} q_{ki} C_{ki}}{\sum_{k=0}^{U^i} q_{ki}} ; \forall j \in D^i \tag{5}$$

em q_{ij} que é o caudal de *i* para *j*; C_{ij} é a concentração da substância em causa no caudal de *i* para *j*; é q_{0i} o caudal de abastecimento no nó a partir que uma fonte externa; C_{0i} é a concentração no caudal de abastecimento.

O processo de transformação, que resulta em mudanças na concentração da substância enquanto é transportada ao longo do escoamento, pode ser descrito pela seguinte equação diferencial unidimensional de conservação de massa. Para um troço genérico ligando o nó *i* ao nó *j*:

$$\frac{\partial C_{ij}}{\partial t} = V_{ij} \frac{\partial C_{ij}}{\partial x_{ij}} + RF(C_{ij}) \tag{6}$$

em *t* que é o tempo; x_{ij} é a distância ao longo do troço, medida desde o nó de montante; V_{ij} é a velocidade de escoamento no troço; $RF(C_{ij})$ é a função que traduz a reacção da substância, a modelar.

Na realidade, C_{ij} na equação acima é uma função tanto da distância percorrida como do tempo:

$$C_{ij} = C_{ij}(x_{ij}, t) \tag{7}$$

O problema, assim, consiste em resolver sequencialmente a equação diferencial (6) em cada troço de conduta, para a qual a condição inicial em *t*=0 é conhecida, sujeita a uma condição de fronteira em x_{ij}=0 fornecida pela equação (5), que pode ser reescrita do seguinte modo:

$$C_{ij}(0,t) = \frac{\sum_k q_{ki} C_{ki}(L_{ki},t) + q_{0i} C_{0i}}{\sum_k q_{ki} + q_{0i}}, \forall k \in U, \forall j \in D \quad (8)$$

em L_{ki} que é o comprimento do troço de *k* para *i*.

2.4 Metodologia para desenvolvimento de modelos

O desenvolvimento de modelos de simulação deverá ser abordado de uma forma estruturada e sistemática, que permita garantir o melhor aproveitamento possível do esforço e recursos investidos, tanto na geração da solução inicial como na manutenção do modelo ao longo da sua vida útil.

A Figura 2.9 esquematiza o faseamento aconselhado para o desenvolvimento de um modelo.

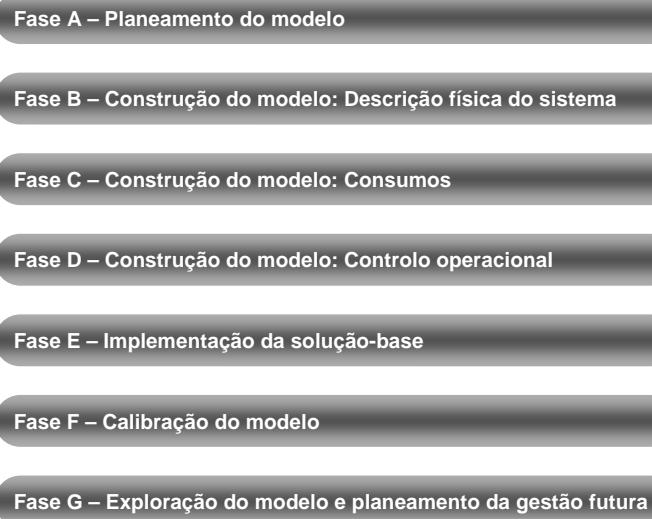



Figura 2.9 – Faseamento do desenvolvimento de um modelo.

Sintetizam-se seguidamente os principais objectivos e os resultados esperados de cada fase do processo de desenvolvimento. A metodologia tem por base a situação de desenvolvimento, no seio de entidades gestoras, de modelos para apoio à operação, reabilitação e manutenção dos sistemas. A metodologia poderá ser adaptada ao caso de modelos para apoio ao projecto e planeamento, sendo a fase de calibração substituída pela verificação de valores de parâmetros físicos e de consumos (incluindo padrões adimensionais de comportamento) a partir de sistemas contíguos, já existentes, de características semelhantes.

Os aspectos mencionados em cada fase são aprofundados na Parte II do deste texto, dedicada exclusivamente ao processo de desenvolvimento de modelos.

2.4.1.1 Fase A – Planeamento do desenvolvimento do modelo

Principais objectivos:

- definição do sistema a estudar, do âmbito e dos objectivos de cada projecto de modelação;
- estabelecimento dos usos preferenciais e prioritários do modelo;

- levantamento preliminar de disponibilidade de dados de cadastro, de facturação e operacionais;
- identificação de necessidades prioritárias de dados complementares, incluindo quando necessário a apresentação de propostas de alteração de procedimentos de recolha de dados;
- definição das convenções a adoptar na modelação;
- definição das opções básicas de modelação;
- definição da equipa de projecto na EG, incluindo o Gestor de Modelo.

Resultados:

- Especificação do objecto do estudo, dos usos prioritários do modelo, do sistema de convenções adoptado, das opções básicas de modelação e da equipa envolvida.

2.4.1.2 Fase B – Construção do modelo – descrição da infra-estrutura física

Principais objectivos:

- recolha de elementos necessários para a descrição física do sistema – cadastro das redes, de reservatórios, de instalações elevatórias, de válvulas utilizadas para operação e outros elementos físicos;
- geração dos dados prioritários eventualmente em falta;
- estruturação dos dados físicos para carregamento no modelo.

Resultados:

- Ficheiro computacional de modelo contendo a descrição física completa do sistema (condutas, nós, reservatórios, válvulas, estações elevatórias e outros dispositivos físicos).
- Relatório conciso descrevendo a forma como foram obtidos e processados os dados físicos inseridos no ficheiro computacional do modelo – se possível no formato de Fichas Técnicas de modelação.

2.4.1.3 Fase C – Construção do modelo – Descrição de consumos e caudais

Principais objectivos:

- recolha e formatação de dados de medição de caudal na rede;
- identificação dos dados prioritários em falta e sua geração através de campanhas de medição na rede;
- análise estatística de dados de caudal, produção de padrões de consumo e tipificação de cenários;
- recolha de elementos relativos à distribuição espacial de consumos na rede;
- estimativa e afectação de consumos nos nós da rede;

- processamento dos dados de consumo para carregamento no modelo.

Resultados:

- Introdução de consumos nos nós e de padrões temporais de consumo no ficheiro computacional do modelo previamente criado – no caso de se pretender criar vários cenários de modelação, existirá pelo menos um ficheiro de modelo por cenário.
- Relatório conciso descrevendo os resultados da modelação de consumos, nomeadamente as características dos dados utilizados, a análise estatística e geração de padrões adimensionais, a tipificação de cenários de consumo e a estimativa e afectação de consumos aos nós da rede. O relatório deverá ainda documentar eventuais alterações relevantes a introduzir ao modo de obtenção deste tipo de informação na EG.

2.4.1.4 Fase D – Construção do modelo – Controlo operacional

Principais objectivos:

- levantamento das regras de operação do sistema, nomeadamente níveis de operação de reservatórios, consignas de caudal, regulações de válvulas e bombas, e modos de operação do sistema de telegestão (caso exista);
- refinamento da tipificação de cenários, baseado na nova informação recolhida;
- introdução dos elementos nas Fichas Técnicas do modelo;
- processamento dos dados para carregamento no modelo.

Resultados:

- Introdução, nos ficheiros computacionais de modelo, dos elementos descritivos das regras operacionais de controlo, níveis de operação de reservatórios, consignas de caudal e regulações de válvulas e bombas.
- Relatório conciso descrevendo as regras operacionais de controlo, níveis de operação de reservatórios, consignas de caudal e regulações de válvulas e bombas. Deverão ser devidamente documentadas as várias configurações físicas e as soluções de modelação adoptadas para as reproduzir.

2.4.1.5 Fase E – Implementação da solução-base

Principais objectivos:

- compilação dos ficheiros completos correspondentes aos cenários modelados, e estabelecimento das respectivas soluções-base (não calibradas) de modelação;

- eliminação dos erros detectáveis e afinação de opções de modelação;
- exploração das capacidades de simulação oferecidas, e primeira abordagem aos objectivos de modelação para ganho de sensibilidade ao modelo;
- desenvolvimento de um Manual do modelo, por compilação e adaptação dos relatórios parcelares anteriores e das Fichas Técnicas desenvolvidas.

Resultados:

- Versões de base plenamente funcionais do modelo, de acordo com os cenários seleccionados previamente.
- Primeira versão do Manual do modelo.
- Relatório conciso descrevendo as versões de base do modelo e os aspectos mais relevantes da fase de eliminação dos erros detectáveis e afinação de opções de modelação.

2.4.1.6 Fase F – Calibração do modelo

Principais objectivos:

- identificação das necessidades de calibração e planificação dos trabalhos a executar:
- realização de campanhas de medição de rede (caudais e pressões) e de ensaios de perda de carga;
- calibração iterativa do modelo por comparação com os resultados de campo.

Resultados:

- Versões calibradas e plenamente funcionais do modelo, de acordo com os cenários seleccionados previamente.
- Actualização do Manual do modelo.
- Relatório conciso descrevendo os ensaios de perda de carga e as medições de rede efectuadas, bem como o processo de calibração do modelo.

2.4.1.7 Fase G – Exploração do modelo e planeamento da gestão futura

Principais objectivos:

- reavaliação dos objectivos prioritários para o modelo, inicialmente determinados na Fase A;
- estabelecimento do modelo em ambiente de utilização final, nos vários departamentos interessados, e exploração com vista à satisfação dos objectivos prioritários;
- estabelecimento de procedimentos de utilização do modelo;
- planeamento do desenvolvimento continuado do modelo;

- estabelecimento de procedimentos de actualização do modelo;
- estabelecimento de uma estratégia de formação interna;
- interligação com os sistemas de informação da EG;
- escolha de uma estratégia futura de software.

Resultados:

- Versões calibradas, funcionais e actualizadas do modelo, de acordo com os cenários seleccionados previamente e com as utilizações finais decididas.
- Manual completo e actualizado do modelo.
- Estrutura interna de gestão do modelo, sob a direcção do Gestor do Modelo.
- Relatório final de desenvolvimento do modelo.

PARTE II – Desenvolvimento de modelos

3 PLANEAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DE MODELOS

3.1 Introdução

O presente capítulo é dedicado à primeira etapa do processo de modelação, o planeamento dos modelos. Os aspectos mais importantes a ter em conta quando se planeia o desenvolvimento de modelos de simulação são os seguintes:

- estabelecimento dos objectivos do(s) modelo(s) e das suas utilizações prioritárias ou preferenciais;
- macro-sectorização do sistema global e definição do(s) sistema(s) a estudar;
- definição das opções básicas de *software*;
- definição das convenções a adoptar na modelação;
- levantamento preliminar de disponibilidade de dados de cadastro, de facturação e operacionais;
- identificação de necessidades prioritárias de dados complementares, incluindo quando necessário a apresentação de propostas de alteração de procedimentos de recolha de dados;
- definição da equipa de projecto, incluindo o Gestor de Modelo, e de um grupo de contacto no seio da entidade gestora.

O texto que se segue respeita esta sequência. Assim, em 3.2 (pág. 38) referem-se aspectos de índole estratégica, como sejam os objectivos da modelação, o processo de identificação de usos prioritários, a macro-sectorização do sistema e o escalonamento do desenvolvimento dos modelos no tempo; o subcapítulo 3.3 (pág. 44) refere-se ao *software* de simulação a utilizar; no subcapítulo 3.4 (pág. 46) procede-se à inventariação, descrição e sistematização dos dados necessários para a construção dos modelos, desde os dados físicos (condutas, reservatórios, válvulas, *etc.*) aos dados de facturação e estimação de consumos, aos dados de caudal e aos dados de controlo operacional, procedendo-se ao levantamento das necessidades de monitorização e equipamento e abordando ainda o tema dos sistemas de unidades a adoptar; em 3.5 (pág. 49), sistematiza-se um conjunto de convenções fundamentais para o desenvolvimento de modelos de simulação e dos sistemas que poderão estar-lhe associados (por exemplo, o sistema de cadastro digitalizado),

abordando a nomenclatura de dados físicos, cenários de simulação, modelos e ficheiros; e o subcapítulo 3.6 (pág. 57) aborda alguns aspectos essenciais para a correcta gestão do desenvolvimento do modelo.

3.2 Aspectos estratégicos

3.2.1 Definição dos objectivos da modelação e identificação de usos prioritários

A identificação conjunta, pela equipa de desenvolvimento do modelo (ver 3.6) e pelos diversos serviços da entidade gestora potencialmente interessados, das utilizações mais importantes a conferir a modelos de simulação do(s) sistema(s) ou sub-sistema(s) sob sua gestão é o primeiro grande passo a ser dado no processo de planeamento.

No desenvolvimento de modelos de simulação, como no da generalidade das metodologias e ferramentas de suporte à actividade de uma entidade gestora, é fundamental definir objectivos de curto, médio e longo prazo a atingir. Em função desses objectivos, pode então ser definida uma estratégia de desenvolvimento, e aferido periodicamente o progresso realizado.

A utilização de uma ferramenta deste tipo sem o estabelecimento de objectivos bem definidos, e portanto sem a possibilidade de avaliar a relação entre o investimento realizado e o benefício obtido, conduz frequentemente à estagnação ou abandono do esforço de desenvolvimento.

Uma primeira abordagem levará à análise, por parte da equipa de desenvolvimento, do tipo de utilizações que poderão interessar à entidade gestora – por exemplo, de entre aquelas citadas na pág. 15 ou nas referências da especialidade, como Rossman (2002), Walski *et al*. (2003), Cesario (1995) ou Alegre (1992; 1990).

Esse conjunto de possíveis objectivos deverá então ser discutido com os sectores que possam de alguma forma estar potencialmente interessados na utilização directa ou indirecta dos modelos e/ou dos seus dados. Os sectores responsáveis pela exploração da rede, pelo planeamento, pelas obras e manutenção, pelo combate às perdas ou pelo controlo da qualidade da água distribuída são habitualmente utilizadores directos da modelação dos sistemas. Entre os utilizadores indirectos, que poderão beneficiar de resultados parciais ou globais, estarão os sectores

responsáveis pela facturação, pela estatística, pela fiscalização urbanística ou pelo planeamento urbano (estes últimos no caso de uma autarquia).

Uma categoria muito importante de potenciais interessados no processo de desenvolvimento são os responsáveis pelos outros sistemas de informação, com os quais os modelos poderão interagir ou partilhar dados: o sistema de telegestão, o sistema de cadastro ou o SIG, o sistema de informação de laboratório (LIMS), o sistema de informação de manutenção e o sistema de facturação, entre outros.

Os modelos de simulação utilizam e agregam uma grande quantidade de informação cadastral, operacional e de facturação, de cuja qualidade dependem os resultados obtidos. O seu correcto desenvolvimento necessita, assim, de garantir a maior eficácia possível na obtenção de dados a partir dos outros sistemas de informação acima citados. Por outro lado, uma vez que tanto as redes de abastecimento como a informação que lhes diz respeito evolui constantemente no tempo, é importante que os responsáveis pelos diferentes sistemas de informação estejam conscientes da existência da ferramenta de modelação, e sejam previstos desde o início os canais adequados de actualização.

3.2.2 Macro-sectorização dos sistemas e selecção de modelos a desenvolver

O(s) sistema(s) de transporte e distribuição de água sob a responsabilidade de uma entidade gestora representam habitualmente um conjunto de macro-unidades de rede, que são geográfica, topológica e hidraulicamente sectorizáveis, e aos quais correspondem frequentemente diferentes tipologias de idade, material e estado das condutas.

A gestão técnica dos sistemas é usualmente organizada em função desses macro-sectores[8], e as necessidades de modelação, seja para exploração, seja para manutenção e reabilitação, seja para planeamento, projecto e construção, são ajustadas em função dessas tipologias. É comum

[8] Trata-se, neste contexto, dos grandes sectores de rede, que não deverão ser confundidos com as unidades operacionais mais pequenas – como as zonas de medição e controlo – em que se dividem aqueles grandes sectores.

corresponderem, aos diferentes sectores, prioridades e objectivos de intervenção diferentes, podendo igualmente haver objectivos e tipos de intervenção aplicáveis a vários dos sectores.

Face aos objectivos explicitados durante a fase descrita em 3.2.1, é possível elaborar uma solução desejável de desenvolvimento de modelos em função dessa macro-sectorização, com objectivos ajustados em função das diferentes prioridades. A tal deverá ser atribuído um escalonamento temporal que permita desde logo antever uma estratégia de médio e longo prazos, sem prejuízo de esta ser periodicamente revista durante o processo de desenvolvimento futuro.

A partir desse escalonamento de macro-sectores por prioridades de intervenção e objectivos da modelação, torna-se mais fácil escolher o modelo ou modelos por onde iniciar o esforço de desenvolvimento.

A ordem deverá reflectir não só o grau de prioridade conferido a cada objectivo pelos intervenientes ou utilizadores, mas igualmente a viabilidade e as possibilidades de articulação entre eles, de forma a serem obtidos modelos de rede funcionais, e cuja aplicação possa atingir resultados eficazes tão cedo quando possível. Este é um aspecto que não deve ser descurado, pois o sucesso que possa ser obtido no curto prazo é importante na motivação da equipa envolvida, e ajuda a justificar o investimento numa tarefa necessariamente longa e por vezes fastidiosa.

Exemplo ilustrativo

A título ilustrativo, analise-se o caso de um típico sistema municipal, composto por um *esqueleto* principal, com funções de adução de água entre as captações e os reservatórios que abastecem as principais redes de distribuição; e dois sectores principais de distribuição, dos quais o maior se encontra por sua vez subdividido em duas zonas de pressão, sendo uma delas bastante extensa.

Numa abordagem directa à modelação da globalidade do sistema, a partir da análise topológica e operacional das redes, verifica-se que o sistema pode ser dividido em: 1 modelo de adução e 4 modelos de distribuição principais, funcionalmente independentes e com possibilidades de medição dos principais caudais movimentados. Os 4 modelos de distribuição correspondem à divisão natural (física e funcional) do sistema em sectores e zonas de pressão. Uma das zonas de pressão, por ser mais extensa, foi ainda dividida em dois sub-sectores de menor dimensão e que se verifica poderem ser tornados hidraulicamente independentes através de simples fecho de válvulas de sector, aparentemente sem consequências para o serviço. Assim, seriam os seguintes os 4 modelos de distribuição (a toponímia utilizada é fictícia):

- Sector *Novo – Zona Baixa (Bairro Velho* e *Vermoim)*
- Sector *Novo – Zona Baixa (Lavadinhas)*

- Sector *Novo – Zona Média*
- Sector *Cidade*

O

Quadro 3.1 (pág. 42) exemplifica a divisão num conjunto de modelos que poderiam ser propostos para este caso, com uma descrição simplificada das freguesias e lugares abastecidos, reservatórios, captações, grupos submersíveis, estações elevatórias, sobrepressoras, pontos de medição (ver ainda 3.4.1 a este respeito) e número aproximado de clientes a abastecer.

Os 4 modelos de sectores de distribuição e o modelo do sistema de adução poderiam ser desenvolvidos de forma independente, sendo os respectivos pontos de interface articuláveis.

Do ponto de vista da modelação, não há usualmente vantagens na formulação do conjunto num só modelo, mais pesado e complexo, podendo as diferentes redes ser modeladas cada uma por si. Os modelos parcelares, incluindo o de adução, podem sempre ser associados entre si com facilidade, por junção dos ficheiros de simulação que lhes correspondem, desde que sejam adoptadas as convenções de nomenclatura adiante referidas em 3.4.

No caso deste exemplo, a análise de objectivos, feita de acordo com os princípios expostos em 3.2.1, teria hipoteticamente resultado na seguinte lista de prioridades:

(1) *O apoio à reabilitação de redes de distribuição, tendo sido identificadas as redes do Sector Novo - Zona Baixa (Bairro Velho e Lavadinhas) como os casos de aplicação mais urgentes.*

(2) *O apoio ao planeamento do sistema de adução, através de um modelo simplificado (possivelmente parcial), disponibilizado o mais cedo possível durante o processo de desenvolvimento, e que permita:*

  (2.a) *a exploração da capacidade de operação dos reservatórios;*

  (2.b) *a minimização dos tempos de bombeamento e o estudo de poupanças energéticas;*

  (2.c) *o estudo do impacte de novas captações e da disponibilização de nova célula de armazenamento no Sector Novo – Zona Média.*

(3) *O apoio ao licenciamento e à revisão do Plano Director Municipal (PDM), em especial nas seguintes redes:*

  (3.a) *Sector Cidade, o qual se espera vir a estar sujeito a grandes pressões urbanísticas a curto e médio prazos;*

  (3.b) *Sector Novo - Zona Baixa (Bairro Velho e Lavadinhas).*

(4) *Apoio ao controlo de perdas de água.*

(5) *Apoio à selecção de pontos de amostragem de qualidade da água.*

Tendo presentes estes objectivos, justificar-se-ia, por hipótese, começar o desenvolvimento de modelos simultaneamente a dois níveis:

(i) *Modelo do sistema de adução*

Modelo completo do sistema de adução, incluindo todas as condutas principais que ligam as captações e os reservatórios (aproximadamente o sistema abrangido pela telegestão), e representando cada sector de distribuição de forma completamente agregada ou quase, por forma a satisfazer o objectivo 2; o modelo poderá igualmente prestar algum apoio ao objectivo 3, sobretudo os aspectos ligados ao PDM; o modelo poderá ser desenvolvido

rapidamente de forma simplificada, e ser completado progressivamente à medida que forem ficando disponíveis os registos de monitorização de caudal e nível, os resultados do seu estudo estatístico e os padrões tipificados de consumo.

(ii) Modelos de detalhe do Sector Novo - Zona Baixa (Bairro Velho/ Vermoim) e Sector Novo - Zona Baixa (Lavadinhas)

Modelos completos das redes de distribuição mais necessitadas de análise na prossecução dos objectivos 1 e 4, sendo os objectivos 3 e 5 também passíveis de virem a ser estudados pelos mesmos modelos.

Após a construção destes modelos, e uma primeira verificação da adequação das metodologias adoptadas, a ordem de desenvolvimento dos restantes modelos deveria ser reavaliada em função das necessidades mais prioritárias.

Quadro 3.1 – Exemplo ilustrativo de um conjunto de modelos propostos para os sectores de distribuição de uma entidade gestora.

Nº do modelo	Nome	Caracterização	Descrição
1	Sector Novo – Zona Baixa (Bairro Velho e Vermoim)	Freguesias / Lugares	• Bairro Velho, Vermoim, Alsina (zona NW)
		Reservatórios de nível variável	• Sepalinho
		Captações	• AC3, AC5
		Grupos submersíveis / estações elevatórias ou sobrepressoras	• grupos submersíveis das captações subterrâneas • estação sobrepressora do Bairro Velho (ainda não entrou em funcionamento)
		Medição de caudais de entrada	• Incompleta, a instalar ou reforçar
		Num. clientes (aprox.)	• 9 500
2	Sector Novo – Zona Baixa (Lavadinhas)	Freguesias / Lugares	• Lavadinhas
		Reservatórios de nível variável	• reservatório baixo de Alpalhais
		Captações	• FR2, FR4, AC2, AC6
		Grupos submersíveis / estações elevatórias ou sobrepressoras	• grupos submersíveis das captações subterrâneas • estação sobrepressora do Lavadinhas
		Medição de caudais de entrada	• Global completa; poderá ser reforçada em sub-zonas
		Num. clientes (aprox.)	• 6 500
3	Sector Novo – Zona Média	Freguesias / Lugares	• Alsina (excepto a zona NW), Fidalguinhos, Santo André, Gateiras e Quinta da Lomba
		Reservatórios de nível variável	• reservatórios baixo e elevado de Alpalhais
		Captações	• FR2, FR4, AC2, AC6
		Grupos submersíveis / estações elevatórias ou sobrepressoras	• grupos submersíveis das captações subterrâneas • estação elevatória de Alpalhais
		Medição de caudais de entrada	• Incompleta, a instalar ou reforçar
		Num. clientes (aprox.)	• 10 600

Nº do modelo	Nome	Caracterização	Descrição
4	Sector Cidade	Freguesias / Lugares	• Viçosa, Sto. António da Charneca, Palmeiras e Quinta do Torrão
		Reservatórios de nível variável	• Viçosa
		Captações	• FR1 e FR3
		Grupos submersíveis / estações elevatórias ou sobrepressoras	• grupos submersíveis das captações subterrâneas
		Medição de caudais de entrada	• Global completa; poderá ser reforçada em sub-zonas
		Num. clientes (aprox.)	• 5 300

3.2.3 Tipo, grau de detalhe e especificação dos modelos

O tipo-base de modelo que é de uma forma geral preconizado, tanto para sectores de distribuição como para sistemas de adução, é um modelo completo de simulação hidráulica, representando em princípio todas as condutas, especificado para simulação em período alargado representando os ciclos diários, semanais e/ ou sazonais mais relevantes na área em estudo.

Os modelos de sistemas de adução deverão procurar representar com o maior detalhe possível as regras operacionais e as topologia e configurações de bombeamentos e reservatórios, sendo desejável uma reprodução eficaz dos automatismos e estratégias de gestão implementados através do sistema de telegestão.

Os modelos desenvolvidos desta forma, utilizando o *software* actualmente disponível (ver 3.3), e após calibração hidráulica eficaz, ficarão habilitados à implementação de capacidades de simulação de parâmetros de qualidade da água, como sejam o tempo de percurso ou a concentração de cloro residual. O tempo de percurso é uma grandeza essencial para, por exemplo, o estudo de estratégias de amostragem. Os modelos deste tipo podem igualmente ser utilizados na análise da mistura de tipos de águas de qualidade distinta.

Para a análise de concentrações de substâncias diluídas na água, como o cloro residual, utilizando um modelo do tipo descrito acima, será necessário um estudo complementar das taxas de evolução dessa substância na água que circula no sistema, e eventualmente da influência nessa evolução das características dos materiais das condutas e restantes componentes.

3.3 Opções básicas de *software*

Encontra-se actualmente disponível no mercado especializado uma grande variedade de *software* para modelação de sistemas de abastecimento de água. A generalidade desses programas oferece capacidades perfeitamente adequadas e muito semelhantes em termos do cálculo dos principais parâmetros hidráulicos e de qualidade da água, situando-se as diferenças sobretudo em aspectos acessórios do cálculo, em capacidades de análise complementar – como a verificação de caudais de incêndio ou o auxílio automatizado à calibração – ou em aspectos ligados à interface gráfica e às capacidades de pré- e pós-processamento dos dados de entrada e resultados.

Um dos aspectos mais importantes a ter em conta nas soluções destinadas à utilização intensiva em ambiente operacional numa entidade gestora – embora não tão crucial na utilização por projectistas ou consultores – é a capacidade de ligação automatizada a um sistema de informação geográfica, por forma a permitir que as actualizações deste sejam reflectidas no modelo, evitando assim duplicar canais de manutenção cadastral.

Um dos programas mais adequados a uma introdução eficaz e perfeitamente competente à simulação de sistemas de abastecimento é o *software* Epanet, desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency (EUA) e traduzido para língua portuguesa pelo LNEC [9].

As principais razões que motivam esta recomendação são as seguintes:

- o programa adequa-se bem às necessidades actuais de simulação do sistema em questão, e está traduzido para português;
- é fiável, bem documentado e beneficia de recursos de consulta importantes, como um *newsgroup* muito participado pelos melhores especialistas mundiais [10];
- é de utilização livre e gratuita, não havendo quaisquer restrições ao seu uso;

---

[9] Ver nota 1 (página 6).
[10] Para subscrever, consultar as instruções publicadas no *website* acima citado.

- dispõe, em particular, de boas capacidades para simulação da qualidade da água na rede, com algoritmos publicados e bem documentados;
- é um *standard* mundial cujo formato de dados é lido por muitos dos principais simuladores do mercado – os modelos desenvolvidos neste *software* podem eventualmente vir a ser transferidos com facilidade para outro *software*, se for opção da entidade gestora vir a adquirir numa fase posterior um simulador diferente.

Como foi referido anteriormente, o modelo de um sistema de abastecimento de água é constituído essencialmente pelos dados que descrevem o sistema físico, as solicitações (consumos) e as condições operacionais (estados de instalações elevatórias, válvulas e outros mecanismos de accionamento). É recomendável que os modelos a desenvolver sejam especificados e documentados de forma a torná-los o menos dependentes possível do *software* utilizado.

A transferência de modelos desenvolvidos no Epanet para outro *software* é facilitada pela circunstância de a maioria dos principais programas actualmente presentes no mercado importarem directamente os formatos Epanet. No entanto, caso se opte por um *software* que não tenha a capacidade de ler o formato de dados do programa que for escolhido para o desenvolvimento, deve notar-se que se trata ainda assim de uma tarefa essencialmente logística de transferência dos dados descritivos do sistema físico, das solicitações e das condições operacionais, mantendo o modelo a sua validade depois de transferido para o novo programa.

A opção pelo Epanet permite assim uma abordagem simples e imediatamente disponível ao desenvolvimento dos modelos, sem custos de aquisição, potenciando toda a fase de aprendizagem e formação do *know-how* interno da entidade gestora, sem prejuízo de mais tarde ser tomada uma decisão de cariz mais definitivo, que poderá indicar a manutenção do mesmo *software* ou a opção por um outro, em função da evolução dos principais sistema de informação da entidade gestora (sistema de telegestão, SIG, sistema de clientes) e da oferta presente no mercado.

A experiência adquirida com o desenvolvimento e utilização em ambiente operacional são fundamentais para a procura das melhores soluções tecnológicas. A escolha do *software* de simulação deverá ser sempre objecto de revisão periódica a cada

3 a 5 anos, em função dos aspectos acima referidos e do desempenho obtido.

3.4 Informação necessária para a construção de modelos

3.4.1 Aspectos gerais

Antes do planeamento de qualquer modelo de simulação, é recomendável uma familiarização com o tipo de informação necessária e com as suas especificidades. Esse conhecimento pode condicionar grandemente as decisões a tomar nesta fase preliminar. Por outro lado, as eventuais lacunas a preencher deverão ser identificadas o mais cedo possível durante o planeamento dos modelos, uma vez que envolvem frequentemente processos morosos de geração e organização de informação, ou de instalação de equipamentos de monitorização.

Os dados necessários para a construção e calibração de um modelo de simulação, que se encontram detalhadamente descritos nos Caps. 4 e 5, podem dividir-se em:

- dados que descrevem as características dos componentes físicos do sistema, tais como condutas, reservatórios, válvulas e bombas, incluindo a referenciação de coordenadas e cotas dos nós que os definem, e o traçado da rede daí resultante;
- dados de consumo e de caudal, que reproduzem o melhor possível a distribuição espacial e o comportamento temporal das solicitações ao sistema, para os cenários a analisar; e
- dados sobre o funcionamento operacional do sistema, que reflectem o modo como os seus componentes controláveis – p.ex., válvulas e grupos elevatórios – são operados para os vários cenários de funcionamento.

3.4.2 Necessidades de monitorização e de equipamento de medição

3.4.2.1 Monitorização

A existência de equipamento de medição para registo de pressão e caudal em locais específicos da rede é fundamental para a quantificação dos consumos totais abastecidos a cada sector,

para a tipificação dos padrões de consumo da rede, para análise de controlo de perdas e para a calibração de modelos hidráulicos.

De um modo geral, cada sector ou sub-sector de uma rede de distribuição ou adução deverá no mínimo possibilitar a monitorização do caudal total consumido. Para os sistemas de adução, cada ponto de entrega deverá ser individualmente medido. Tal significa que devem ser criadas condições para que todas as entradas de caudal no sector e todos os pontos de transferência para outros sectores ou redes possam ser monitorizados. A definição dos sectores ou sub-sectores de uma rede deve atender a esse facto, e procurar minimizar as necessidades de medição, dado que nem sempre a existência de pontos de medição é física ou economicamente viável.

A sectorização de uma rede para efeitos de cálculo de volumes, de controlo de perdas ou de modelação hidráulica e de qualidade é grandemente dificultada se a contabilização dos volumes totais consumidos não for possível. Assim, a localização de medidores permanentes ou de instalações que possibilitem a montagem de medidores portáteis (caixa de acesso e troço recto de conduta desimpedido num comprimento determinado) tem de ser garantida em função da definição dos sectores ou sub-sectores em causa.

Para além dos registos de caudal, os registos de altura de água nos reservatórios podem ser também utilizados de forma indirecta para obter volumes escoados e determinar os padrões de consumo da rede.

A medição da pressão, particularmente importante para a calibração hidráulica dos modelos, pode ser efectuada com medidores portáteis em marcos de incêndio, estações elevatórias (na conduta de aspiração ou de compressão), reservatórios e válvulas.

A monitorização de parâmetros de qualidade da água, como o cloro residual, é importante para a calibração dos modelos de qualidade da água e definição de campanhas de amostragem. Não é habitual instalar-se medidores em contínuo de cloro residual a não ser à saída dos principais reservatórios ou instalações de cloragem/ recloragem. A monitorização de parâmetros de qualidade da água para efeitos de modelação é frequentemente executada por recurso a campanhas temporárias, dirigidas para cada área específica em estudo.

3.4.2.2 Equipamento de medição

Para além dos medidores permanentes que deverão ser previstos para satisfazer as necessidades referidas no ponto anterior, o desenvolvimento das fases de aquisição de dados para o estudo de consumos pressupõe normalmente a necessidade de dispor de um ou mais medidores portáteis de caudal que permitam a afinação das estimativas por sectores e sub-sectores.

Note-se que a utilidade de medidores de caudal, permanentes ou portáteis, transcende em muito o domínio dos modelos de simulação. A eficaz prática do controlo de caudais em redes de distribuição, para controlo de perdas, minimização de gastos energéticos e gestão operacional da rede, depende de uma adequada rede de medição. As estratégias modernas de controlo de caudais tendem a aconselhar a divisão das redes de distribuição em zonas de medição e controlo (ZMC) de dimensão não superior a 3000 pontos de consumo, ou cerca de 7000 habitantes.

No caso de sistemas de adução, é fundamental a quantificação dos caudais escoados nos principais sectores, bem como de todos os pontos de entrega, como já se referiu.

A calibração dos modelos (Etapa F da metodologia geral) de redes de distribuição pressupõe o recurso a um número de medidores de pressão que, em termos médios, deverá situar-se entre os 8 e os 12 para um sector elementar de calibração ou ZMC, com a dimensão média de 5000 a 7000 habitantes. A calibração pode em regra geral ser efectuada de forma rotativa, pelo que um número entre os 15 e os 20 deverá ser suficiente para a cobertura dos modelos maiores, tirando ainda partido das medições permanentes de pressão ou nível já existentes.

No caso dos sistemas de adução, a medição de pressões é menos exigente, pois os sistemas são topologicamente mais simples e estão frequentemente já dotados de manómetros em pontos-chave, podendo os níveis nos reservatórios ser igualmente utilizados para esse fim. Assim, não é habitualmente necessário o número de medidores de pressão anteriormente referido, sendo preferível uma avaliação caso a caso em função das disponibilidades de medição e das exigências do modelo.

Os medidores de pressão deverão ser fiáveis, ter uma precisão e gama de leitura adequadas[11], e poder ser ligados a registadores do tipo *datalogger*, o que simplifica e torna mais eficaz o tratamento dos dados resultantes. O preço mais elevado dos aparelhos com *datalogger* é habitualmente compensado por não necessitarem de operador permanente, uma vez que podem ser instalados e deixados a registar por um período de tempo.

Uma alternativa ou complemento ao uso de *dataloggers* é a ligação dos equipamentos de medição a emissores rádio ou do tipo GSM, para transmissão directa dos valores medidos a uma central.

A previsão de necessidades de equipamento de medição de qualidade da água deverá ser efectuada quando forem definidos os objectivos da análise. Em todo o caso, o estudo de parâmetros como o cloro residual poderá ser efectuado com recurso a um conjunto de medidores portáteis do tipo *kit*, cuja aquisição poderá ser articulada com a programação da amostragem já regularmente efectuada para efeitos de verificação na entidade gestora.

3.5 Convenções a adoptar

3.5.1 Aspectos gerais

A geração dos dados necessários para a construção de um modelo obriga geralmente à recolha de um elevado volume de informação, a qual pode encontrar-se dispersa pelas várias unidades operativas envolvidas, e disponível em formatos diversos. Importa definir um conjunto de convenções que permitam uniformizar e codificar a informação disponível, por forma a facilitar a utilização e a eliminação de erros do modelo, assim como a sua manutenção contínua.

Adicionalmente, todos os ficheiros e pastas em que se traduz a implementação computacional do modelo devem ser organizados de forma adequada, adoptando igualmente uma convenção de

[11] A gama de leitura deverá ser ajustada à gama de pressões presente nas redes em estudo; o erro máximo admissível deverá ser inferior a ±3 mca, ou aprox. ±5 psi.

nomenclatura comum por forma a facilitar a gestão dos ficheiros e manter sob controlo a proliferação de versões diferentes do modelo.

De uma forma geral, os elementos que compõem um modelo – os elementos descritivos da rede (condutas, válvulas, *etc.*), as solicitações (consumos e respectivos padrões de variação temporal) e as regras de operação – poderão ter associações geográficas, temporais ou de cenários de simulação.

Os pontos seguintes referem-se aos aspectos a ter em consideração na codificação de informação relativa aos tipos de dados acima mencionados. Contudo, as propostas de convenção que se apresentam podem e devem ser ajustadas por forma a adoptar convenções já existentes no seio da entidade, tais como as utilizadas nos principais sistemas de informação – sistema de clientes ou de facturação, sistema de informação geográfica, sistema de telegestão, sistema de manutenção, etc. –, nos manuais de codificação patrimonial e noutros instrumentos de apoio à gestão.

Em particular, quando os dados físicos de um modelo são gerados de forma automática a partir de um SIG, é desejável – e quase inevitável – que a codificação de identificação dos elementos físicos do sistema seja importada para o modelo. A compatibilização do modelo e do SIG é neste caso não só uma questão de coerência e facilidade de consulta, como – e sobretudo – uma condição essencial para que a actualização do segundo seja automaticamente reflectida no primeiro e não sejam duplicados os esforços neste domínio.

3.5.2 Nomenclatura de dados físicos

A nomenclatura a conferir aos elementos físicos da rede – condutas, válvulas, reservatórios, estações elevatórias – e aos nós de modelação deverá obedecer a alguns critérios que importa referir. Habitualmente, utiliza-se um código alfanumérico, já suportado pela maioria dos simuladores existentes no mercado, que é composto por um campo alfanumérico, identificativo do elemento e sector, rede ou modelo em que se insere, e por outro campo numérico sequencial.

Assim, um código típico de um elemento do tipo conduta teria o seguinte aspecto:

Tnm6650

A primeira letra do campo alfanumérico designa habitualmente o tipo de elemento, utilizando-se p.ex. **N** para nó, **T** para troço conduta, **V** para válvula, **R** para reservatório (sendo **RF** um reservatório de nível fixo e **RV** um reservatório de nível variável – ver 4.3.7) e **B** para bomba.

Os caracteres que se lhe seguem poderão incluir informação geográfica ou do sector de rede, ou ainda detalhar o tipo de dispositivo, no caso de válvula ou reservatório, como se verá mais adiante. No caso do exemplo acima apresentado, os caracteres *nm* pretendem identificar o sector-zona a que pertence a conduta, p.ex. Sector Novo – Zona Média.

Em relação à codificação das válvulas, poderá ainda incluir-se na sigla uma indicação do tipo de válvula[12]: **VRC** – válvula reguladora de caudal; **VAL** – válvula de alívio; **VRP** – Válvula redutora de pressão; e **VBL** – válvula de borboleta.

Tal procedimento é aconselhável no caso de se utilizar um *software* de simulação, de cadastro ou de SIG que não diferencie os vários tipos de válvulas através de pictogramas diferentes (p.ex., o Epanet 2.0 utiliza o símbolo ⋈ para todos os tipos de válvulas). Nesses casos, a inclusão do tipo de válvula na própria sigla facilita a leitura do mapa e das tabelas e gráficos de resultados dos modelos.

A numeração a introduzir no campo numérico deve ser sequencial, com um incremento entre códigos consecutivos não inferior a 10, para permitir a inserção posterior de novos elementos sempre que tal seja necessário.

Refira-se que a generalidade dos programas semelhantes disponíveis no mercado permitem definir um incremento automático na criação de novos códigos alfanuméricos. Se o incremento fosse hipoteticamente de 10, a numeração das condutas contíguas àquela citada no exemplo acima seria Tnm6660, Tnm6670, Tnm6680, e assim por diante.

O sistema de codificação a adoptar para os nós e troços da rede deve conter informação necessária e suficiente para permitir localizar facilmente na rede um elemento de um destes tipos. O código alfanumérico a incluir para localizar geograficamente um

---

[12] Consultar 4.3.10 para informação sobre os diferentes tipos de válvulas.

elemento deve ser compatível com a partição da rede em termos de modelos hidráulicos a construir, deve ser estável, quer em termos do funcionamento operacional da rede, quer em termos de expansão da própria rede, e deve referir-se a uma área geográfica não muito pequena, por forma a evitar a ocorrência de nomenclaturas redundantes.

Apresenta-se seguidamente um exemplo de convenção para os elementos físicos do sistema. Preliminarmente, ilustra-se no Quadro 3.2 uma convenção de nomenclatura para elementos de localização geográfica. É habitual utilizar-se uma nomenclatura geográfica que identifique os macro-sectores, os sectores e as ZMC de acordo com o que foi exposto anteriormente.

Quadro 3.2 – Convenções de nomenclatura: localização geográfica (exemplo).

Elemento	Subdivisão	Campo alfanumérico	Campo numérico
Sector -zona	Sector Novo – Zona Baixa: Lavadinhas	nb1	-
	Sector Novo – Zona Baixa: Bairro Velho e Vermoim	nb2	-
	Sector Novo – Zona Média	nm	-
	Sector Cidade	ce	-
Freguesia	Lavadinhas	lav	-
	Bairro Velho (zona urbana)	bar	-
	Vermoim (zona urbana)	ver	-
	Alsina (zona urbana)	als	-
	Santana	sta	-
	Palmeiras	pal	-
	Sacada	sac	-
	Cois	coi	
Ponto de abastecimento	Alpalhais	alp	-
	Sepalinho	sep	-
	Viçosa	vic	-
	Cois	coi	-
	Pena	pen	-

Quadro 3.3 – Convenções de nomenclatura: dados físicos e nós da rede (exemplo).

Elemento	Nome ou descrição	Campo alfanumérico	Campo numérico
Nós	Sector Novo – Zona Baixa: Lavadinhas	Nnb1	10 – 5000
	Sector Novo – Zona Baixa: Bairro Velho, Vermoim	Nnb2	6000 – 15000
	Sector Novo – Zona Média	Nnm	20000 – 30000
	Sector Cidade	Nce	40000 – 50000
Reservatórios	Alpalhais elevado	RValpE	-
	Alpalhais baixo	RValpB	-
	Sepalinho	RVsep	-
	Viçosa	RVvic	-
	Pena	RVpen	-
	Cois elevado	RVcoiE	-
	Cois baixo	RVcoiB	
Captações	FR4	RFfr4	-
	FR2	RFfr2	-
	AC2	RFac2	-
	AC6	RFac6	-
	FR3	RFfr3	-
	FR1	RFfr1	-
	AC3	RFac3	-
	AC5	RFac5	-
Troços	Sector Novo – Zona Baixa: Lavadinhas	Tnb1	10 – 5000
	Sector Novo – Zona Baixa: Bairro Velho e Vermoim	Tnb2	6000 – 15000
	Sector Novo – Zona Média	Tnm	20000 – 30000
	Sector Cidade	Tce	40000 – 50000
Válvulas (exemplifi-cada com uma VRP)	Sector Novo – Zona Baixa: Lavadinhas	VRPnb1	(sequencial, a compatibilizar com numeração utilizada no sistema de telegestão)
	Sector Novo – Zona Baixa: Bairro Velho e Vermoim	VRPnb2	
	Sector Novo – Zona Média	VRPnm	
	Sector Cidade	VRPce	
[illegible]	Gr. sobrepressores de Lavadinhas	Blav	(sequencial, a

Elemento	Nome ou descrição	Campo alfanumérico	Campo numérico
	Gr. elevatórios Alpalhais baixo – Alpalhais elevado	BalpB	compatibilizar com numeração utilizada no sistema de telegestão)
	Gr. sobrepressores Pena	Bpen	
	Gr. elevatórios Cois – Pena	Bcoi	
	Gr. elevatórios Cois – Cois	Bcoi	
	Gr. elevatório Cois – Sepalinho	Bcoi	
Grupos elevatórios submersíveis	FR4	Bfr4	-
	FR2	Bfr2	-
	AC2	Bac2	-
	AC6	Bac6	-
	FR3	Bfr3	-

No

Quadro 3.3 apresenta-se um exemplo fictício de convenção de nomenclatura para os elementos físicos e nós da rede, utilizando os códigos de referenciação geográfica atrás ilustrados.

3.5.3 Nomenclatura relativa a cenários de simulação

As solicitações da rede, representadas pelo consumo humano, têm um comportamento essencialmente estocástico, que apresenta variações cíclicas diárias tipificáveis e padrões sazonais em função de factores como o dia da semana ou a estação do ano, ou uma evolução ao longo dos anos.

Desta forma, há um conjunto de parâmetros que caracterizam os cenários a representar pelos modelos – tais como os padrões de consumo, as regras de operação de bombas ou válvulas ou os níveis de controlo dos reservatórios – que variam em função dessa sazonalidade.

O tema dos cenários a modelar é tratado em 4.3.11.4. Apresenta-se no Quadro 3.4, a título de exemplo, o tipo de convenção de nomenclatura que é habitual utilizar-se para traduzir essa variabilidade de cenários, em função do ano, da época do ano e do dia da semana. Os códigos sugeridos poderão ser utilizados como prefixos nos elementos que traduzem os cenários, tais como os padrões de consumo ou os ficheiros que contêm os modelos.

Quadro 3.4 – Convenções de nomenclatura: dados temporais (exemplo).

Elemento	Subdivisão	Campo alfanumérico	Campo numérico
Ano de consumo	p.ex:, ano 2001	-	01
Época do ano	Época alta	A	
	Época média	M	
	Época baixa	B	
Período da semana	Sábados	SA	-
	Domingos e feriados	DO	-
	Dias úteis	UT	-
	Fim-de-semana	FS	-
	Outros	OU	-

As regras de controlo a especificar no modelo destinam-se a descrever o funcionamento operacional do sistema (ver 4.5) e pretendem traduzir as regras implementadas no sistema de telegestão e os procedimentos utilizados pelos operadores na exploração diária da rede (p.ex., abertura ou fecho de um by-pass a um reservatório).

Deste modo, propõe-se que a identificação de cada controlo contenha o código do elemento a controlar (conduta, bomba ou válvula), a indicação do período, época e ano de consumo e a condição de estado: *Open* ou *Closed* para conduta; *Open*, *Closed* ou *Setting* para bombas e válvulas, sendo o código *Setting* aplicável quando os parâmetros velocidade da bomba ou parâmetro de controlo numa válvula são ajustados.

O Quadro 3.5 contém alguns exemplos do acima exposto.

Quadro 3.5 – Convenções de nomenclatura: identificação das regras de controlo (exemplo).

Significado	Código do controlo
Controlo para *arranque* dos grupos elevatórios 1 e 2 de Lavadinhas nos dias úteis, em época baixa, no ano de 2001.	Rule Blav01&02 _UT_B_01_Open
Controlo para *paragem* dos grupos elevatórios 1 e 2 de Lavadinhas nos dias úteis, em época baixa, no ano de 2001.	Rule Blav01&02 _UT_B_01_Closed
Controlo que *regula* o caudal numa válvula reguladora de caudal em função da altura água num reservatório de nível variável	Rule VRCnb1_UT_B_01_Setting

3.5.4 Nomenclatura relativa a modelos e ficheiros

Os actuais programas de simulação declinam habitualmente os modelos num conjunto de ficheiros de vários tipos, cujos nomes devem também ser codificados atendendo a um conjunto de identificadores para facilitar a sua gestão e o controlo de versões.

No Quadro 3.6 apresentam-se, como exemplos, os ficheiros de dados e de resultados disponibilizados pelo Epanet 2.0 e as fichas técnicas que servem de base para a construção dos ficheiros de dados do modelo. Como exemplo, refere-se um sistema de codificação contendo os seguintes campos: sector-zona, período da semana, época de consumo do ano, ano em análise e versão do modelo.

Deste modo, o nome dos ficheiros pode ser especificado de acordo com o seguinte exemplo, para o caso do ficheiro de dados (.inp):

NB-UT- A-01-V01.inp

o que corresponderia a um ficheiro que descreveria o modelo de um hipotético Sector Novo – Zona Baixa (NB), nos dias úteis (UT), para a época alta (A), no ano de 2001, versão 01.

Quadro 3.6 – Tipos de ficheiros utilizados no Epanet 2.0.

Categorias	Tipo de Ficheiro
Dados	Ficheiro de dados (.inp) Ficheiro de mapa (.map) Ficheiro de padrão (.pad) Ficheiro de curvas (.crv) Ficheiro de cenário (.scn)
Resultados	Ficheiro binário de resultados (.net) Ficheiro de relatório (.rpt) Ficheiro de texto (.txt)
Auxiliares	Fichas técnicas (.xls)

3.6 Gestão do desenvolvimento do modelo

3.6.1 Equipa técnica do modelo e grupo de contacto

A concepção e exploração de modelos de simulação implica a definição de um corpo técnico responsável pelo seu desenvolvimento e permanente actualização no seio da própria entidade.

Este aspecto advém da metodologia preconizada para a realização do projecto, a qual pressupõe uma participação activa dos serviços técnicos da entidade gestora nas diferentes etapas da modelação da rede de abastecimento de água (ver 2.4 e 3.2).

Deverá, assim, existir uma *equipa técnica do modelo*, liderada pelo *Gestor do Modelo* e composta pelo(s) técnico(s) que procedem directamente ao desenvolvimento, implementação e actualização; e uma equipa técnica alargada, composta pelos técnicos dos vários sectores operacionais interessados, funcionando como um *grupo de contacto* no seio da entidade gestora.

A interacção entre as diferentes divisões é fundamental, desde as etapas iniciais que envolvem o levantamento dos dados para a construção dos modelos, até à utilização dos modelos como ferramenta de apoio à gestão operacional e ao planeamento.

Os elementos da equipa técnica do modelo devem possuir formação em engenharia civil, hidráulica, mecânica ou

equivalente, e formação específica em modelação de sistemas de abastecimento de água.

O grupo de contacto deverá cobrir as seguintes valências:

- planeamento e projecto de infra-estruturas urbanas;
- manutenção do cadastro das infra-estruturas e ligação a sistemas de informação geográfica;
- exploração da rede;
- facturação e gestão de clientes.

A equipa a integrar o projecto deve ter também a função posterior de colaborar na formação interna dos potenciais utilizadores nas diferentes divisões da entidade gestora.

A coordenação e o planeamento das diferentes actividades relacionadas com os modelos devem ser executados pelo Gestor do Modelo, cujas funções específicas se encontram detalhadas em 3.6.2.

3.6.2 Gestor do modelo

O Gestor do Modelo tem a responsabilidade do sucesso da actividade de modelação e da disponibilização atempada de modelos válidos para os fins necessários no seio da entidade gestora, de acordo com as estratégias pré-definidas.

Cabe ao Gestor do Modelo coordenar as seguintes tarefas:

- estabelecer os procedimentos de actualização dos modelos e garantir que esta é levada a cabo com periodicidade adequada, em termos de cadastro, dados físicos, controlos e consumos;
- planear campanhas periódicas de calibração dos modelos, de modo a assegurar a sua actualidade e fiabilidade;
- garantir o controlo de versões do modelo, de modo a que as versões de referência só possam ser criadas / modificadas pelo Gestor do Modelo;
- planear as actividades de desenvolvimento, como seja a (re)definição dos usos prioritários do modelo e das equipas afectas ao desenvolvimento/exploração do modelo;
- definir as necessidades de *software*, de equipamento de medição ou de contratação de equipas especializadas;
- coordenar a ligação dos modelos com os outros sistemas de informação;

- sensibilizar os potenciais beneficiários para as vantagens do uso sistemático dos modelos e promover a realização de acções de formação internas.

4 CONSTRUÇÃO DE MODELOS

4.1 Princípios de base

A construção de um modelo de simulação passa pela recolha ou geração, e pela compilação em formatos específicos, da informação que descreve:

(i) a topologia, geometria, altimetria e características (passíveis de influenciar o comportamento hidráulico e dos parâmetros de qualidade da água) da infra-estrutura física – condutas, válvulas, reservatórios, bombas e outros elementos;

(ii) as solicitações ao sistema, sob a forma de consumos e caudais, tanto na sua distribuição espacial como na escala e variação temporal;

(iii) o funcionamento operacional do sistema, para os vários cenários de gestão técnica a simular.

A escolha dos métodos a empregar para executar qualquer das três tarefas, mas sobretudo as duas primeiras – que representam a maior parcela do volume de trabalho acarretado pelo desenvolvimento de um modelo – é um passo crucial na racionalização do esforço a realizar e no aproveitar das eventuais sinergias que possam ser conseguidas, nomeadamente com o desenvolvimento paralelo dos outros sistemas de informação da entidade gestora.

É importante, neste processo, manter presentes alguns princípios fundamentais:

- Os mecanismos de obtenção de dados deverão basear-se em procedimentos repetíveis e o menos onerosos possível, a bem da futura manutenção do modelo. Mais importante do que a construção de um modelo, que se processa apenas uma vez, é a sua manutenção futura que, se for bem sucedida, se projectará por muito mais tempo.

- O modelo é apenas uma ferramenta ao dispor da gestão técnica da EG, não a sua razão de ser. É importante que a actividade de modelação seja estabelecida da forma o menos intrusiva possível, aproveitando ao máximo canais de informação existentes, processos de aquisição e actualização de dados de outros sistemas (como o SIG ou o sistema de telegestão), e os técnicos que os executam. Quanto menor for o acréscimo de carga laboral representado pela nova actividade, maior a probabilidade de sucesso no longo prazo.

- A duplicação de informação entre os vários sistemas de informação é indesejável. Quando for inevitável, então deverão ser tomadas todas as precauções para que haja consistência entre as várias representações. No actual universo dos sistemas de informação de uma entidade gestora de abastecimento de água, o sistema de informação geográfica aparece cada vez mais como a unidade central aglutinadora, capaz de guardar, pesquisar e exprimir um enorme espectro de informação cadastral, comercial, administrativa, patrimonial e técnica. Este sistema tem uma natureza horizontal na EG. Assim sendo, torna-se cada vez mais evidente, por exemplo, que a informação que descreve a infra-estrutura física deve ser introduzida primeiro no SIG e depois migrar daí para os outros sistemas, incluindo o modelo.
- A qualidade dos dados introduzidos no modelo condiciona directamente a qualidade dos resultados obtidos. Exigir resultados precisos de um modelo mal desenvolvido é equivalente ao anacronismo burocrático de culpar o computador por erros de processamento humano. O esforço necessário para desenvolver correctamente o modelo deverá ser avaliado o melhor possível, e assumido na plenitude. Por outro lado, na análise dos resultados de um modelo deverá estar sempre presente como, e com que qualidade, foram gerados os dados que descrevem o sistema, os consumos e as regras de operação.

O presente capítulo descreve com algum detalhe os dados necessários para a construção de um modelo. Aborda igualmente questões de índole prática destinadas a complementar essa informação com um conjunto de procedimentos e métodos para a correcta compilação dos dados no formato pretendido. Os aspectos focados destinam-se a procurar uma racionalização dos tempos de trabalho envolvidos, tanto na construção da solução inicial como da sua futura correcção e manutenção de longo prazo, e a obter soluções correctas do ponto de vista dos objectivos da modelação.

4.2 Sistemas de unidades

Os simuladores existentes permitem que se adoptem diferentes sistemas de unidades (p.ex., Sistema Internacional, Sistema americano, Sistema Imperial Britânico) para o carregamento dos

dados descritivos do modelo e para a expressão dos seus resultados.

Deste modo, antes de se iniciar o carregamento de dados para um modelo devem ser configuradas as opções relevantes do software relativas a este aspecto, em função do formato e das unidades em que se encontre registada a informação disponível, na entidade gestora do sistema em causa.

Sendo o Sistema Internacional de Unidades (ou sistema SI) o mais utilizado em Portugal e na generalidade dos países europeus (à excepção do Reino Unido), é conveniente notar algumas variações comuns no meio técnico ligado à engenharia hidráulica e que se encontram reflectidas nas opções disponíveis na maioria dos programas de simulação. Assim, as unidades de medida adoptadas para os principais parâmetros são as indicadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Unidades do sistema SI, com algumas variantes, utilizadas para as principais grandezas em jogo na modelação de sistemas de abastecimento de água.

Parâmetro	Unidades
Carga hidráulica	m (metro de coluna de água equivalente)
Caudal	m^3/h (metro cúbico por hora) ou l/s (litro por segundo)
Coeficiente de perda de carga localizada	adimensional
Comprimento	m (metro)
Concentração	mg/l ou µg/l (miligrama por litro ou micrograma por litro)
Consumo	(ver unidades de caudal)
Cota	m (metro)
Diâmetro (reservatórios)	m (metro)
Diâmetro (condutas, válvulas ou bombas)	mm (milímetro)
Energia	kWh (kilowatt hora)
Factor de perda de carga	adimensional
Tempo de percurso (ou idade da água)	h (hora)
Perda de Carga Unitária	m / km (metro por quilómetro)

Parâmetro	Unidades
Potência	kW (kilowatt)
Pressão (altura piezométrica)	m (metro de coluna de água equivalente)
Rendimento	(%) (percentagem)
Velocidade	m/s (metro por segundo)
Volume	m^3 (metro cúbico)

4.3 Descrição dos componentes físicos

4.3.1 Introdução

Como foi já referido, os dados necessários para a descrição de um modelo encontram-se divididos em três grupos: dados físicos sobre a rede, dados sobre os consumos e sobre os caudais, e dados sobre o funcionamento operacional da rede.

Os dados físicos da rede descrevem os componentes do sistema, tais como condutas, reservatórios, válvulas e bombas, incluindo a referenciação de coordenadas e cotas dos nós que os definem, o traçado da rede daí resultante, e a respectiva topologia.

Os dados de consumo e de caudal procuram reproduzir o melhor possível a distribuição espacial e o comportamento temporal das solicitações ao sistema, segundo os cenários tipificados (e.g., consumo em época baixa, média e alta; consumo em dia de semana, sábado e domingo). Para cada cenário modelado, consistem numa atribuição de um valor nominal de consumo a cada nó (por categoria de consumo), e de um ou mais diagramas de variação temporal (padrões de consumo).

Os dados sobre o funcionamento operacional descrevem o modo como o sistema é operado para os vários cenários de funcionamento, e traduzem-se na especificação de níveis-limite de operação nos reservatórios, no escalonamento temporal do arranque e paragem de bombas, abertura, fechamento e regulação de válvulas.

A informação sobre os dados do modelo encontra-se descrita nos pontos seguintes, de uma forma tão genérica quanto possível, de forma a ser aplicável à generalidade dos programas para simulação de sistemas de abastecimento de água disponíveis no mercado. Inclui uma descrição da informação necessária para o modelo e dos procedimentos de recolha e estruturação.

4.3.2 Aspectos gerais relativos à recolha da informação de base

Não é indispensável dispor da totalidade da informação de base sobre os componentes físicos de um sistema para preparar uma primeira versão, necessariamente preliminar, do respectivo modelo. O conhecimento dos dados de base e a preparação de um modelo válido são processos de aproximações sucessivas que funcionam de modo iterativo durante todo o processo de construção e calibração, até que um ajuste final satisfatório – em função dos objectivos predefinidos – é conseguido.

O cadastro da rede deverá constituir a principal fonte de informação geográfica e física para um modelo. Um cadastro correcto deverá estar actualizado e deverá conter, entre outros elementos, informação sobre o diâmetro, material e revestimento interno (caso se aplique) das condutas, para além dos acessórios montados e o esquema de ligações entre as condutas. Os cadastros raramente contêm um tipo de informação particularmente importante para os modelos: o estado de conservação das condutas. Este influencia o valor do diâmetro interno útil e a rugosidade das condutas. Este aspecto é sobretudo relevante no caso de condutas metálicas, passíveis de corrosão interna, ou em sistemas que transportam água de características incrustantes.

Outro aspecto que é de importância crucial para modelos que pretendam reproduzir a situação corrente do sistema, como é o caso dos modelos destinados ao apoio à operação e manutenção, é a localização e estado de válvulas de seccionamento, sobretudo aquelas que se encontram habitualmente fechadas, e a localização de válvulas utilizadas para efeitos de operação.

É frequente existirem no seio de uma entidade gestora diferentes versões do mesmo cadastro, na posse dos diferentes sectores operativos. A construção de modelos poderá funcionar como motivação para a unificação e requalificação desses registos, bem como ajudar a criar novos e mais eficientes mecanismos de manutenção.

Mesmo quando o cadastro é único e se encontra actualizado, é aconselhável que a construção dos modelos seja complementada com as fontes que seguidamente se referem, ainda que apenas para efeitos de verificação:

(i) consulta aos actuais e antigos encarregados do acompanhamento de obras e responsáveis pela manutenção

da rede; a quantidade e qualidade da informação de que estas pessoas habitualmente dispõem e que não está registada é de considerável valor, não devendo em caso algum ser subestimada;

(ii) consulta a projectos e, quando disponíveis, às telas finais das intervenções efectuadas na rede; notar que durante as obras de execução é frequente haver alterações relativamente ao projecto, muitas vezes não registadas na tela final, devendo procurar-se validar a informação recolhida deste modo junto de pessoas que tenham estado ligadas às obras;

(iii) levantamentos directos no terreno; frequentemente há dúvidas suscitadas por informação incoerente proveniente de fontes diversas, tais como a duplicação de cadastros, que devem ser esclarecidas pela observação directa, por exemplo, da localização de válvulas, bocas de rega e incêndio, ramais, *etc.*; por outro lado, é fundamental conhecer as cotas topográficas onde estão instalados (ou irão sê-lo, durante a fase de calibração do modelo) os medidores de pressão, e é vantajoso conhecer as cotas de todos os nós considerados no modelo; se esta informação não existir ou não estiver completa no cadastro, será necessário proceder a levantamentos topográficos; é frequentemente necessário um levantamento directo da topologia e modo de operação das instalações especiais, como reservatórios e estações elevatórias;

(iv) recolha de amostras de condutas, em caso de suspeita de incrustações ou como forma de verificar o estado geral daquelas; esta actividade pode ser efectuada aproveitando os trabalhos rotineiros de reparação e/ou substituição de condutas; os conhecimentos do pessoal que trabalha nestas funções deverão ser aproveitados pro-activamente para a estimativa do estado das condutas;

(v) em casos especiais, onde haja necessidade absoluta de uma estimativa precisa e esta não possa ser obtida ou confirmada de outra forma, o aspecto referido em (iv) poderá ser complementado com a inspecção de condutas utilizando câmaras de vídeo ou aparelhos de fibra óptica.

4.3.3 O traçado da rede e a localização de nós de modelação

Como já foi referido, na convenção adoptada nos modelos de simulação, os nós são elementos fictícios criados para modelar

pontos específicos da rede e são introduzidos sempre que há necessidade de delimitar um troço. Um troço poderá ser uma conduta, uma válvula ou uma bomba[13]. As duas últimas categorias são habitualmente modeladas com um comprimento desprezável, e justificam automaticamente um nó a montante e outro a jusante. Já na modelação de condutas, deverão ser introduzidos nós de delimitação, pelo menos, em todos os pontos que impliquem descontinuidades nas características físicas da tubagem:

- intersecções, cruzamentos ou derivações de condutas;
- mudança de diâmetro, material, idade, classe de pressão ou outra característica da tubagem.

Para além dos nós de delimitação de troços, que são obrigatórios, os restantes nós são aquilo que se convenciona designar por nós de modelação. Estes deverão ser introduzidos nas descontinuidades e pontos notáveis de ordem hidráulica, operacional ou mesmo geográfica:

- mudanças de zona de medição e controlo (zmc), sector ou andar de pressão;
- mudanças de arruamento;
- pontos altos e pontos baixos de determinada conduta (por exemplo, onde se localizem ventosas ou descargas de fundo)[14].

Nos pontos notáveis do ponto de vista do consumo:

- grandes consumidores (p.ex:, hospitais, escolas, centros desportivos, instalações industriais);
- consumidores sensíveis (i.e., cujo abastecimento seja particularmente importante para os objectivos do modelo);
- ao longo das condutas de serviço, localizados por forma a garantir que o número de consumidores representados por cada nó não exceda um limite predeterminado.

Nos pontos notáveis do ponto de vista das medições de rede:

---

[13] Como já foi referido, há programas de simulação que implementam válvulas e bombas como nós especiais.

[14] Os pontos extremos de cota, numa conduta, podem interessar para efeitos de verificação de valores da pressão.

- pontos de calibração de pressões;
- pontos de medição de caudal e outras grandezas.

Nos pontos em que ocorram dispositivos especiais:

- pontos de (re)cloragem;
- aspersores de rega.

Resta referir que há nós especiais que fogem ao descrito acima: os reservatórios são formalmente nós de modelação, que têm como particularidade a possibilidade de armazenar volumes de água segundo leis pré-definidas, e de condicionar localmente a carga hidráulica, introduzindo condições de fronteira ao modelo.

Para efeitos de modelação, não é absolutamente necessário incluir na representação da rede todas as válvulas de seccionamento e/ou isolamento da rede. Os modelos actuais consideram estas válvulas como equipamento básico de qualquer conduta, e como tal não são individualizadas na representação esquemática.

Qualquer conduta do modelo possui assim, por defeito, a capacidade de ser isolada através do accionamento de uma válvula de seccionamento virtual. O mesmo pode ser dito das válvulas de retenção, que podem ser accionadas em qualquer conduta, sem ser necessário para o efeito introduzir especificamente a válvula.

Assim, deve reter-se que as válvulas a introduzir num modelo devem, na medida do possível, cingir-se às válvulas que são efectivamente accionáveis ou reguláveis na operação do sistema – ou seja, aquelas cujo estado possa ser modificado durante uma simulação do sistema, actual ou futura, real ou hipotética. Exceptuam-se naturalmente as situações em que se pretenda representar no modelo um particular arranjo de válvulas por razões de consistência com um SIG ou cadastro, mesmo que essas válvulas não venham a ser operadas em funcionamento normal ou hipotético do sistema.

Por outro lado, na importação directa da descrição do sistema a partir de um SIG, poderá ser inevitável a inclusão de todas as válvulas, por não ser possível ou prático distinguir automaticamente as válvulas reguláveis das válvulas de seccionamento.

4.3.4 Condutas

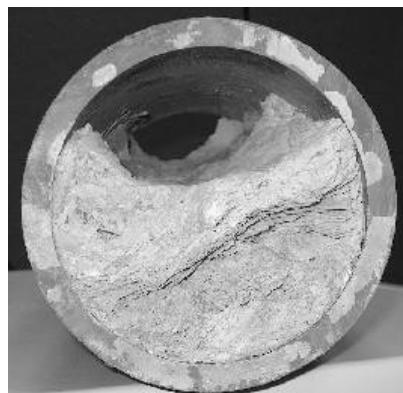
Num modelo de simulação, cada conduta deve ser caracterizada pelas seguintes propriedades obrigatórias (Quadro 4.2): um código identificativo (ou ID), o nó inicial, o nó final, o comprimento, o diâmetro e um coeficiente de rugosidade. Outras propriedades poderão ser descritas, com cariz opcional, como coeficientes de perda de carga singular ou de interacção com parâmetros de qualidade da água.

Quadro 4.2 – Propriedades essenciais das condutas.

Propriedade	Descrição
ID da conduta	Identificação da conduta de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.
Nó inicial	Identificação do nó onde começa a conduta.
Nó final	Identificação do nó onde termina a conduta.
Comprimento	Comprimento real da conduta.
Diâmetro	Diâmetro interno da conduta.
Rugosidade	Coeficiente da fórmula de perda de carga na conduta.

O código identificativo ou ID da conduta é usualmente um código alfanumérico, cujo significado e utilidade foram já debatidos em 3.5.2.

A ordem pela qual são referidos os nós inicial e final é arbitrária, convencionando-se que um valor negativo do caudal numa conduta (e também, em alguns simuladores, da velocidade), num determinado instante de simulação, significa que o sentido do escoamento é inverso ao que foi inicialmente definido pela referida ordem. Assim, se uma determinada conduta é descrita pelo nó inicial *i* e pelo nó final *f*, um valor positivo do caudal significa que o escoamento se verifica de *i* para *f*; e um valor negativo, que o fluxo se dá de *f* para *i*.

O comprimento de uma conduta é um elemento essencial de cálculo, devendo ser inserido o valor que corresponde, com a maior exactidão possível, ao comprimento efectivo da conduta no terreno. Devem manter-se presentes os aspectos referidos em 4.3.2, e ter-se em atenção que é possível e frequente que o traçado marcado na cartografia cadastral não corresponda exactamente à verdade, podendo conter simplificações.

É importante manter presente que o valor de comprimento utilizado no cálculo é aquele especificado pelo utilizador como propriedade da conduta, e não necessariamente aquele que resulta da sua representação no desenho da rede, na interface gráfica do simulador.

Como excepção explícita a esta regra, vários simuladores oferecem a possibilidade de calcular automaticamente o comprimento das condutas sobre o desenho, a partir do sistema de coordenadas utilizado. Esta opção só deverá ser utilizada se o traçado da rede no simulador tiver sido efectivamente desenhado à escala (p.ex., sobre um desenho de fundo igualmente à escala) ou se tiver sido importado a partir de um cadastro informatizado ou de um SIG, onde essa condição tenha sido verificada. Nestas circunstâncias, deverá garantir-se que as escalas correctas são utilizadas em todo o processo, caso contrário o simulador irá utilizar no cálculo comprimentos de conduta que não correspondem à verdade.

Na especificação do diâmetro, convém recordar que o valor a introduzir é o diâmetro *interno* da conduta. Nem sempre o valor nominal que caracteriza a tubagem utilizada corresponde a essa medida – p.ex., os materiais plásticos, como o PVC ou o PEAD, são habitualmente especificados pelo diâmetro externo. Por outro lado, uma tubagem pode ter o seu diâmetro interno reduzido por efeito de deposições (Figura 4.1a), por vezes de forma bastante dramática (Figura 4.1b).

(a) (b)

Figura 4.1 – Deposições calcárias em condutas de distribuição.

A estimativa do diâmetro útil, neste caso, deverá tirar o máximo partido de toda a informação disponível sobre o estado das condutas, nomeadamente a inspecção de amostras de conduta retiradas do sistema aquando de trabalhos de manutenção, como as da figura acima (ver considerações a este respeito em 4.3.2).

A rugosidade das condutas é uma das principais incógnitas, e consequentemente um dos principais factores de incerteza, na construção de um modelo. Para o coeficiente de rugosidade, como primeira aproximação, deve ser adoptado um valor em função das características do material da conduta e do seu provável estado de conservação, e nos termos da fórmula considerada para o cálculo da perda de carga contínua – é habitual serem oferecidas pelo *software* várias opções para este efeito, como as fórmula de Hazen-Williams, de Chezy-Manning ou de Darcy-Weisbach (ver 2.3.2).

Quadro 4.3 – Equações para o cálculo da perda de carga contínua.

Equação	Expressão com ΔH (m); Q (m^3/s); D (m); L (m)
Darcy-Weisbach	$\Delta H = 0.083 fQ^2 D^{-5} L$
Hazen-Williams	$\Delta H = 10.7 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} D^{-4.87} L$
Chezy-Manning	$\Delta H = 10.3 nQ^2 D^{-5.33} L$

O domínio da estimação dos parâmetros relacionados com a rugosidade interna das condutas, que condicionam a perda de carga contínua, é um dos principais tópicos da hidráulica dos escoamentos em pressão. Tabelas de coeficientes de rugosidade para os diversos materiais e estados de conservação das tubagens – habitualmente expressos em função da idade – podem ser encontradas em múltiplas publicações, de que se destacam Quintela (1981), Cesario (1985), Lencastre (1996) e Walski *et al.* (2003). O Quadro 4.4 contém uma lista dos principais materiais empregues em condutas de abastecimento de água, e respectivos coeficientes de rugosidade que servem apenas como valores indicativos.

Quadro 4.4 – Coeficientes de rugosidade para condutas novas de abastecimento de água.

Material	Hazen-Williams Coeficiente *C*	Chezy-Manning Coeficiente *n*	Darcy-Weisbach *k* (mm)
Materiais cimentícios			
Fibrocimento	140	0.011 – 0.013	0.4 – 1.2
betão	130	0.011 – 0.013	0.3 – 3.0
Materiais plásticos			
Policloreto de baixa, média ou alta densidade	140 - 150	0.009 – 0.011	$1.5x10^{-3}$
Policloreto de vinilo	140- 150	0.009 – 0.011	$1.5x10^{-3}$
Poliéster reforçado com fibra de vidro	140- 150	0.009 – 0.011	$1.5x10^{-3}$
Materiais metálicos			
Ferro fundido não revestido	120 - 130	0.012	0.226
Ferro fundido revestido	130 - 140	0.013	0.102
Aço	140 - 150	0.010 – 0.012	$2.8x10^{-3}$ - $5.8x10^{-3}$

Factores com a dimensão, o tipo e a idade da conduta ou a qualidade da água podem influenciar o valor do coeficiente de rugosidade. O recurso a medições na rede, por exemplo através da realização de testes de perda de carga (ver 5.3.4), constitui a melhor forma de aferir os coeficientes de rugosidade adoptados. A sistematização dos valores do coeficiente de rugosidade para condutas do mesmo material e diâmetro, mas com idades diferentes permite construir curvas que relacionem os valores do coeficiente de rugosidade com a idade.

É ainda habitualmente possível associar a uma conduta ou válvula um coeficiente de perda de carga localizada, devido a curvas, alargamentos, estreitamentos e outros acessórios (Rossman, 2002), de acordo com uma expressão do tipo:

$$\Delta H_L = K_L \frac{V^2}{2g} = K_L \frac{Q^2}{2gA^2} \qquad (9)$$

Em que ΔH é a perda de carga localizada (m), K_L o coeficiente de perda de carga localizada, V é a velocidade do escoamento (m/s),

Q o caudal (m3/s), g a aceleração da gravidade (m/s^2) e A a área da secção transversal da conduta (m^2).

O Quadro 4.5 contém valores sugeridos para as principais singularidades dos sistemas de condutas em pressão.

Quadro 4.5 – Coeficientes de perda de carga localizada para acessórios de condutas em pressão (Walski *et al.*, 2003).

Acessório	Coeficiente de perda de carga localizada	Acessório	Coeficiente de perda de carga localizada
Entrada		Válvula de cunha aberta	0.39
Aresta viva (reservatório – tubagem)	0.50	¾ abertura	1.10
Aresta viva (tubagem - reservatório)	1.00	½ abertura	4.80
Estreitamento brusco		¼ abertura	27
D_2/D_1 = 0.8	0.18	Válvula de globo aberta	10
D_2/D_1 = 0.5	0.37	Válvula de borboleta	1.20
D_2/D_1 = 0.2	0.49	Válvula de retenção	4.00
Estreitamento cónico		Curva a 90º	
D_2/D_1 = 0.8	0.05	Raio da curvatura/D = 4	0.16 – 0.18
D_2/D_1 = 0.5	0.07	Raio da curvatura/D = 2	0.19 – 0.25
D_2/D_1 = 0.2	0.08	Raio da curvatura/D = 1	0.35 – 0.40
Alargamento brusco		Curva a 45º	0.20
D_1/D_2 = 0.8	0.16	Tê	
D_1/D_2 = 0.5	0.57	Escoamento na conduta principal	0.30 – 0.40
D_1/D_2 = 0.2	0.92	Escoamento conduta principal - ramal	0.75 – 1.80
Alargamento cónico			
D_1/D_2 = 0.8	0.03		
D_1/D_2 = 0.5	0.08		
D_1/D_2 = 0.2	0.13		

Como foi mencionado em 4.3.3, o isolamento de um troço de conduta pode ser modelado sem a necessidade de serem introduzidas válvulas de seccionamento, uma vez que é comum os simuladores proporcionarem a possibilidade de definir um estado aberto ou fechado para as condutas. Em vários dos simuladores

actualmente disponíveis, é ainda possível incorporar uma válvula de retenção numa conduta, especificando a propriedade de "estado inicial" para *CV* (*check valve*). Deste modo, o sentido do escoamento é fixado, processando-se sempre do nó inicial para o nó final e o estado da conduta não poderá ser alterado utilizando controlos (Rossman, 2002).

4.3.5 Nós

As propriedades essenciais para a caracterização de um nó são o código identificativo e a cota do terreno. Os nós que representem pontos de consumo devem ainda ser caracterizados por informação relativa ao respectivo consumo-base e ao(s) padrão(ões) temporal(is) associado(s). O consumo-base representa o valor médio ou nominal do consumo de água da categoria principal de consumo no nó. O padrão temporal multiplica o consumo-base e representa um comportamento ao longo do tempo. A forma de especificar consumos num modelo é descrita detalhadamente em 4.4.3.

Durante a modelação, o consumo no nó em cada instante do dia resulta do produto do consumo-base pelo valor do factor multiplicativo do padrão temporal nesse instante. Poderá haver mais do que um par consumo-base / padrão de consumo num nó, resultado da acumulação de duas ou mais categorias de consumo (ver 4.4.3). Um valor negativo no consumo-base serve para indicar a existência de uma origem externa de caudal no nó. Descrevem-se no Quadro 4.6 as propriedades essenciais a especificar para cada nó da rede.

Quadro 4.6 – Propriedades essenciais dos nós.

Propriedade	Descrição
ID do nó	Identificação do nó de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.
Cota	Cota acima de um determinado referencial comum.
Consumo-base	Valor médio ou nominal do consumo de água da categoria principal de consumo no nó, medido em unidades correntes do caudal.
Padrão de consumo	Identificação do padrão temporal utilizado para caracterizar a variação do consumo com o tempo para a principal categoria de consumo no nó.

4.3.6 Dispositivos emissores

Os dispositivos emissores estão associados a nós que modelam o escoamento através de orifícios ou agulhetas com descarga

directa para a atmosfera. O caudal através destes dispositivos varia em função da pressão no nó, de acordo com uma lei de vazão do tipo:

$$Q = C\,p^{\gamma} \qquad (10)$$

sendo Q o caudal, C o coeficiente do emissor, p a pressão e γ o expoente da lei de vazão. Para orifícios e agulhetas, o parâmetro γ é igual a 0.5. Os fabricantes fornecem, usualmente, o valor do coeficiente de vazão em unidades de caudal para uma queda de pressão unitária (p.ex., l/min, Δp=1 bar). Os dispositivos emissores são utilizados para modelar o escoamento em sistemas com aspersores e em redes de rega[15]. Estes dispositivos também podem ser utilizados para simular perdas em tubagens (se o coeficiente de vazão e o exponente da pressão, para a fuga na junta ou fissura poderem ser estimados) ou modelar o caudal de combate a incêndio num nó (o caudal disponível nos pontos de pressão mínima da rede). No último caso, utiliza-se um valor muito elevado para o coeficiente de vazão e adiciona-se à cota do terreno a pressão mínima requerida (m.c.a.) para combate a incêndio. O EPANET modela os dispositivos emissores como sendo uma propriedade do nó e não como um componente separado.

4.3.7 Reservatórios

Os programas de simulação actuais, como o Epanet 2.0, oferecem habitualmente duas formas distintas de modelar reservatórios: reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV).

Os RNF são nós especiais em que a cota da superfície livre é fixada pelo utilizador e não é alterada pelo processo de cálculo. Um RNF estabelece, assim, uma condição de fronteira que representa uma origem ou destino de água cuja capacidade se

---

[15] Os dispositivos do tipo emissor são modelados através de uma tubagem fictícia que liga o nó a um reservatório fictício. Se pretender obter o caudal num emissor cuja descarga se realiza para a atmosfera, o nível de água no reservatório fictício é igual à cota do nó. Se pretende obter o caudal para uma pressão particular, deve configurar o coeficiente de vazão do dispositivo e adicionar ao nível no reservatório fictício a altura piezométrica requerida.

possa considerar ilimitada – ou seja, não influenciável pelas condições hidráulicas do sistema a modelar (no cenário considerado). Utiliza-se habitualmente este formalismo para representar em reservatório de muito grande capacidade (face à magnitude dos caudais de entrada e saída), uma captação (de superfície ou subterrânea) ou um sistema vizinho, que abasteça ou seja abastecido pelo sistema a modelar.

É habitual poder especificar-se, para um RNF, seja um nível constante, seja um nível condicionado por determinado padrão de variação, fornecido pelo utilizador e não alterável pelo processo de cálculo. Os dados habitualmente necessários para a modelação de RNF são indicados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Dados essenciais para a modelação de RNF.

Propriedade	Descrição
ID	Identificação do reservatório, captação ou sistema, de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.
Cota	Cota da superfície livre (cota piezométrica, no caso de um furo artesiano ou de um sistema).
ID do padrão	Identificação de um padrão de variação da superfície livre (ou cota piezométrica).

Quadro 4.8 – Dados essenciais para a modelação de RNV.

Propriedade	Descrição
ID da célula	Identificação do reservatório (célula) de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.
Cota	Cota da soleira do reservatório.
Altura de água mínima	Altura mínima da superfície livre acima da cota de fundo.
Altura de água máxima	Altura máxima da superfície livre acima da cota de fundo.
Diâmetro (diâmetro equivalente)	Especificar esta propriedade para reservatórios de secção constante: diâmetro para reservatórios com secção circular e diâmetro equivalente para reservatórios com secção não-circular.
Curva de volume	Identificação da curva de volume utilizada para descrever a relação entre o volume no reservatório e a altura de água. Se não for fornecido qualquer valor é assumido que a secção é constante.

Os RNV são nós especiais que possuem capacidade de armazenamento limitada, e em que o volume de água

armazenado pode consequentemente ser alterado ao longo do tempo, numa simulação em período alargado. Os RNV são utilizados para modelar qualquer reservatório ou tanque cujo volume armazenado e cota da superfície livre variem durante o cenário a simular, como consequência do balanço entre o caudal entrado e o caudal saído em cada passo de cálculo.

Os reservatórios de nível variável são modelados para operar entre as alturas de água mínima e máxima especificadas pelo utilizador. A definição das alturas de água faz-se em relação à cota de soleira do reservatório. O simulador interrompe a saída ou entrada de caudal se for atingida a altura de água mínima ou máxima, respectivamente. Apresentam-se no Quadro 4.8 os dados essenciais para a modelação de RNV e no Quadro 4.9 alguns dados complementares que é útil coligir para a sua caracterização.

Quadro 4.9 – Dados complementares para a caracterização dos reservatórios.

Propriedade	Descrição
Tipo	Elevado, apoiado, semi-enterrado ou enterrado.
Material	Material de que é revestido o interior do reservatório
Secção transversal	Constante ou variável.
Geometria da secção transversal	Circular, rectangular ou outra.
Altura de entrada de água	Altura acima da cota de fundo a que a água entra no reservatório. Informação importante para se conhecer como vai modelar a entrada de água no reservatório (i.e., entrada abaixo ou acima da superfície livre).
Número de células	Número de células do reservatório (caso sejam modeladas conjuntamente).
ID das captações	Identificação das captações que o abastecem. Ver nomenclatura em 3.5.2.
ID dos reservatórios	Identificação dos outros reservatórios com os quais comunica. Ver nomenclatura em 3.5.2.
Sector (es) da rede a abastecer	Ver nomenclatura em 3.5.2.
Freguesias a abastecer	Ver nomenclatura em 3.5.2.

Referem-se seguidamente alguns aspectos importantes a considerar na modelação de reservatórios: a ligação de condutas de entrada e saída a um reservatório de nível variável e as formas de entrada de caudal nos reservatórios (i.e., abaixo ou acima da superfície livre).

4.3.7.1 Ligação conduta de entrada – reservatório – conduta de saída

Deve evitar-se a ligação de mais de uma conduta ao mesmo reservatório (o que acontece, por exemplo, na modelação de combinações do tipo nó de montante + conduta + RNV + conduta + nó de jusante) que pode, em certos casos, provocar instabilidade numérica nas malhas fictícias criadas a partir dos reservatórios. Esta particularidade é comum a muitos dos simuladores que utilizam formulações de malhas ou híbridas.

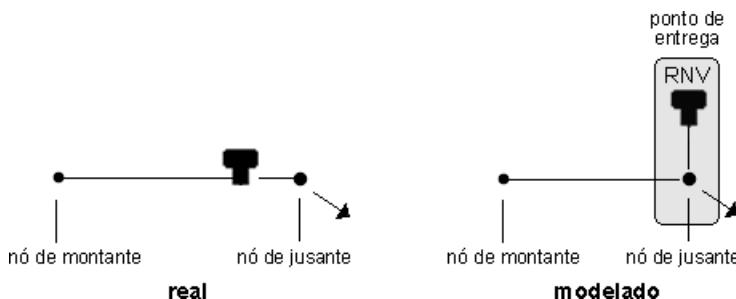



Figura 4.2 – Exemplo de modelação da ligação de condutas a um reservatório.

A solução aconselhada, que é hidraulicamente equivalente, é a ligação do RNV a um nó de passagem ou nó de jusante, à mesma cota do terreno, através de uma conduta fictícia de comprimento unitário e diâmetro grande (com perda de carga desprezável), tal como exemplificado na Figura 4.2, Nesta solução, o caudal que passa na conduta de ligação, em cada momento, é igual à diferença entre o caudal que entra e o caudal que sai do RNV.

4.3.7.2 Reservatório com entrada de caudal abaixo da superfície livre e com regulação de caudal

Os RNV que não tenham funções de reservatório de extremidade devem ser modelados com uma válvula de retenção (CV) a montante do nó de jusante, de forma a impedir que a água armazenada no RNV se escoe para montante (ver 4.3.10).

As válvulas de seccionamento existentes a montante e a jusante dos reservatórios devem ser modeladas como válvulas de borboleta (TCV), às quais pode estar associado um coeficiente de perda de carga localizada (ver 4.3.10). As válvulas destinadas à regulação do caudal devem ser modeladas como válvulas reguladoras de caudal (FCV), com o parâmetro de controlo igual à consigna de caudal estabelecida (ver 4.3.10).

Os reservatórios com entrada de caudal abaixo da superfície livre e com regulação de caudal devem ser modelados de acordo com a seguinte topologia: nó do sistema a montante do RNV + TCV + nó de transição + conduta com comprimento unitário + nó de transição + FCV + nó de transição + conduta com comprimento unitário (CV) + nó de jusante + conduta curta + RNV (Figura 4.3).

As condutas com comprimento unitário inseridas entre válvulas destinam-se apenas a evitar o encadeamento directo destas, o que pode acarretar instabilidade numérica em alguns simuladores.

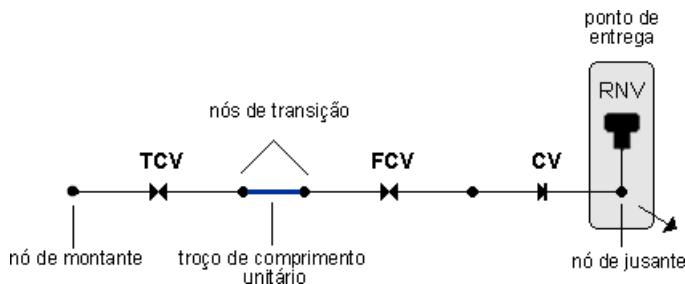



Figura 4.3 – Exemplo de modelação de um reservatório com entrada de caudal abaixo da superfície livre e com regulação de caudal.

4.3.7.3 Reservatório com entrada de caudal acima da superfície livre e com regulação de caudal

No caso dos reservatórios com entrada de caudal acima da superfície livre e com regulação de caudal, deve adoptar-se a seguinte topologia (Figura 4.4): nó do sistema a montante do RNV + TCV + nó de transição + conduta com comprimento unitário + nó de transição + FCV + nó de transição + conduta com comprimento unitário + nó de transição + PSV + nó de transição + CV + nó de jusante + conduta curta + RNV.

A inclusão da válvula de alívio (PSV), fictícia, é um artifício de modelação utilizado neste caso para simular uma entrada acima da superfície livre. Esta válvula é regulada para um valor de pressão correspondente à altura a que está a entrada de água no reservatório; a água só entra no reservatório se a pressão disponível for igual ou superior ao nível a que está a entrada de água.

Se existir uma FCV regulada para uma determinada consigna de caudal a montante de uma PSV, e se a PSV for activada, fechando de modo a garantir um valor mínimo de pressão a montante, a capacidade de transporte a montante diminui. Neste caso, é comum o programa de simulação emitir uma mensagem advertindo que a FCV não consegue debitar o caudal consignado, aviso esse que não representa uma condição de erro.

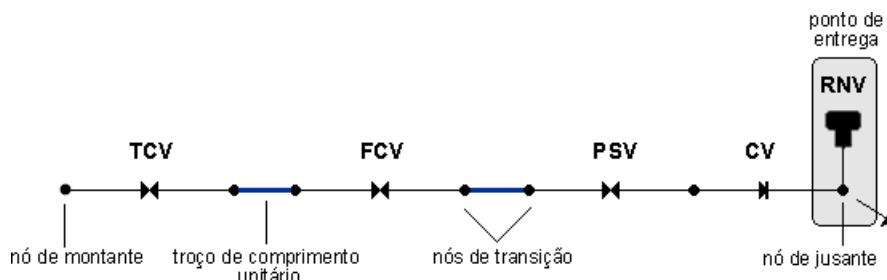



Figura 4.4 – Exemplo de modelação de um reservatório com entrada de caudal acima da superfície livre e com regulação de caudal.

4.3.8 Captações

Num modelo, uma captação subterrânea do tipo furo ou dreno é representada por um reservatório de nível fixo (RNF) ligado a uma bomba por um troço de conduta de comprimento unitário, uma vez que, no caso de uma bomba submersível, não existe conduta de aspiração (Figura 4.5). Apresentam-se no

Quadro 4.10 as propriedades essenciais para a modelação de um furo como um RNF: ID do RNF e Nível de água.

As bombas são troços da rede especiais que transferem energia para o escoamento, aumentando a carga hidráulica (ver 4.3.9). Uma bomba deve ser caracterizada obrigatoriamente pelas seguintes propriedades: ID da bomba, nó inicial e nó final. A bomba encontra-se ligada ao sistema de adução através de uma

conduta de compressão, a qual também deve ser representada e caracterizada no modelo. No Quadro 4.11 descrevem-se as propriedades indispensáveis para a modelação de uma bomba submersível (i.e., grupo elevatório + conduta de compressão + curva característica da bomba).

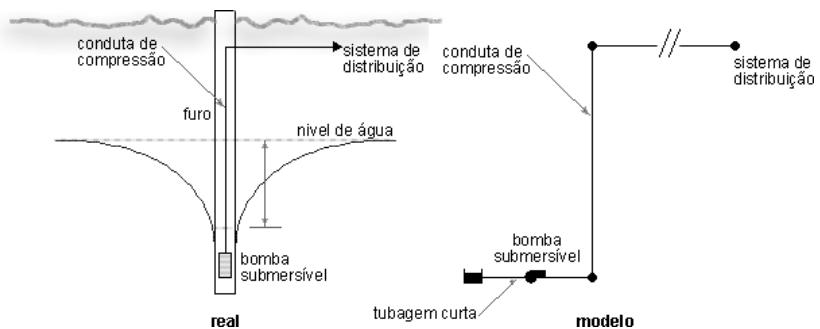



Figura 4.5 – Representação de furos no modelo.

Quadro 4.10 – Dados para a modelação do furo.

Propriedade	Descrição
ID do furo ou dreno	Identificação do furo ou dreno de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.
Nível de água	Carga hidráulica correspondente ao nível de água (estático/dinâmico).
Reservatório a abastecer	Identificação do(s) reservatório(s) a abastecer.

Quadro 4.11 – Dados para a modelação de um grupo submersível + conduta de compressão + curva característica da bomba.

Elemento	Propriedade	Descrição				
Bomba	ID da bomba	Identificação da bomba de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.				
	Tipo	Velocidade fixa ou velocidade variável.				
	ID da Curva	Identificação da curva característica da bomba de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.				
	Potência	Potência fornecida pela bomba. Preencher se não for conhecida a curva da bomba.				
	Regulação de velocidade	Regulação de velocidade em relação ao valor nominal. Deixar em branco se a bomba for de velocidade fixa.				
Curva característica da bomba	Valores de caudal (Q)	Q (unid. caudal)	x1	x2	x3	x4
	Valores de altura de elevação (H)	H (m)	y1	y2	y3	y4
Conduta de compressão	ID da conduta					
	Diâmetro	-				
	Comprimento	-				
	IDs e cotas dos nós inicial e final	-				

4.3.9 Instalações elevatórias

Uma bomba é modelada como um troço especial da rede que transfere energia para o escoamento, aumentando a sua carga hidráulica. Os principais dados a inserir no programa, relativos à bomba, são os nós inicial e final e a curva característica (combinação de valores de caudal e de carga hidráulica que definem a curva de funcionamento).

Se não for conhecida a curva da bomba, esta pode ser representada pela potência, fornecendo um valor constante de energia ao escoamento, para todas as combinações de caudal e carga hidráulica, simplificação que pode não ser válida para toda a gama de valores de caudal.

No Epanet 2.0 e em muitos dos simuladores disponíveis, o escoamento através de uma bomba é unidireccional, pelo que não é necessário a introdução de uma válvula de retenção a jusante da bomba. No caso de uma bomba de velocidade variável, a propriedade “regulação de velocidade” é utilizada para a respectiva parametrização.

Quadro 4.12 – Dados essenciais para a modelação de cada bomba de uma estação elevatória.

Propriedade	Descrição					
ID da bomba	Identificação da bomba de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.					
Tipo	Velocidade fixa ou velocidade variável.					
ID da Curva	Identificação da curva característica da bomba de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.					
Potência	Potência fornecida pela bomba. Preencher se não for conhecida a curva da bomba.					
Regulação de velocidade	Regulação de velocidade em relação ao valor nominal. Deixar em branco se a bomba for de velocidade fixa.					
Curva característica da bomba	Valores de caudal (Q)	Q (unid. caudal)	x1	x2	x3	x4
	Valores de altura de elevação (H)	H (m)	y1	y2	y3	y4

4.3.10 Válvulas

Do ponto de vista da modelação, as válvulas são troços especiais de comprimento nulo, que provocam uma perda de carga de acordo com determinadas características e limitam assim a pressão ou o caudal para jusante. Uma válvula pode ser utilizada no modelo para representar um dispositivo deste tipo que exista fisicamente no sistema, o que constitui a sua aplicação mais frequente, ou como artifício para simular condições de funcionamento específicas.

Entre os tipos de válvulas modelados pelo Epanet 2.0, por exemplo, encontram-se a válvula de borboleta, a válvula redutora de pressão, a válvula de alívio e a válvula reguladora de caudal.

Os dados essenciais para modelação genérica de válvulas encontram-se especificados no Quadro 4.13. Na generalidade dos simuladores actualmente disponíveis no mercado, as válvulas de seccionamento e as válvulas de retenção não são modeladas

como elementos individualizados, mas sim como atributos das condutas, podendo estar activadas ou não (consultar o manual de utilização do *software* de simulação).

Quadro 4.13 – Dados essenciais para a modelação de uma válvula.

Propriedade	Descrição
ID da válvula	Identificação da válvula de acordo com a convenção adoptada. Ver nomenclatura em 3.5.2.
Nó inicial	Identificação do nó de entrada do escoamento na válvula.
Nó final	Identificação do nó de saída do escoamento na válvula.
Diâmetro	Diâmetro da válvula.
Tipo	Tipo de válvula (consultar o manual do *software* de simulação).
Parâmetro de controlo	Parâmetro necessário para descrever as condições de operação da válvula (consultar o manual do *software* de simulação).

4.3.10.1 Válvula de retenção (CV)

As válvulas de retenção impedem que o escoamento nas condutas se processe num dos sentidos. Destinam-se geralmente a evitar a inversão do escoamento nas bombas ou a garantir que os volumes de água armazenados nos reservatórios não retornam à rede. No caso das estações elevatórias, não é necessário modelar as válvulas de retenção existentes a jusante dos grupos, uma vez que simuladores como o Epanet não permitem a inversão do escoamento através de um grupo electrobomba. Devem colocar-se válvulas de retenção a montante dos reservatórios de nível variável, mesmo nos casos em que os reservatórios possuam uma entrada de caudal por cima, configuração que por natureza impede a inversão do escoamento. No caso do Epanet, uma válvula de retenção é modelada como um atributo da conduta, não como uma válvula individualizada – o estado inicial da conduta é neste caso especificado como possuindo uma CV, o que faz com que o escoamento na conduta se possa processar apenas do nó inicial para o nó final, e com que a conduta seja dada como fechada no caso oposto.

4.3.10.2 Válvula de seccionamento

As válvulas de seccionamento constituem o tipo de válvula mais comum nos sistemas de distribuição de água, e destinam-se a interromper o escoamento nas secções onde se encontram

instaladas. São por vezes também utilizadas para regular o escoamento, função para a qual não estão normalmente vocacionadas. Estas válvulas são utilizadas para sectorizar zonas da rede e facilitar as operações de manutenção. Os simuladores existentes permitem que este tipo de válvula seja definido como uma propriedade da própria conduta, a qual pode estar fechada ou aberta, simplificando, deste modo, o volume de informação a fornecer ao modelo.

4.3.10.3 Válvula de borboleta (TCV)

As válvulas de borboleta destinam-se a regular ou a interromper o escoamento nas secções onde se encontram instaladas. As válvulas de seccionamento mais importantes são modeladas como válvulas de borboleta (TCV). Para este tipo de válvulas, o parâmetro de controlo a especificar corresponde a uma relação entre o grau de fecho e a perda de carga resultante.

4.3.10.4 Válvula reguladora de caudal (FCV)

As válvulas reguladoras de caudal servem para limitar o caudal máximo (consigna de caudal) na conduta onde estão inseridas. A regulação de caudal é efectuada através da propriedade "parâmetro de controlo", podendo ser variável ao longo do tempo. No Epanet 2.0, quando o caudal que circula na conduta onde que a válvula está inserida é inferior ao valor estipulado, o programa emite uma mensagem de aviso do tipo: `"warning message: FCV 209 open but cannot deliver flow"`. Esta mensagem de aviso é apenas informativa e surge sempre que não seja possível ou desejável fornecer o caudal para o qual foi regulada, situação essa que pode ser frequente e é perfeitamente aceitável.

4.3.10.5 Válvula redutora de pressão (PRV)

As válvulas redutoras de pressão têm como função controlar a pressão para jusante da secção onde estão montadas, por forma a não exceder o valor especificado na propriedade "Parâmetro de Controlo". Assim, este tipo de válvula vai fechando ou abrindo consoante a pressão a montante, por forma a provocar uma perda de carga que resulta numa pressão a jusante igual à regulação da válvula. Se a pressão a montante for inferior à regulação, a válvula abre completamente e a pressão a jusante será igual à de montante. O parâmetro de regulação é o valor desejado para a pressão a jusante.

4.3.10.6 Válvula de alívio (PSV)

A válvula de alívio destina-se a manter um determinado valor da pressão a montante da secção onde está montada, se as condições o permitirem. Assim, a válvula está activa por forma a manter a montante uma pressão igual ao valor desejado, quando a pressão a jusante é inferior a esse valor; abre completamente se a pressão a jusante for superior a esse valor, mas inferior à pressão a montante; e fecha se a pressão a jusante for superior à de montante, pois não permite a inversão do escoamento. Este tipo de válvula é frequentemente utilizado como artifício de simulação para modelar uma entrada de caudal por cima num RNV. A válvula é regulada de modo a manter um valor mínimo de pressão a montante do RNV, igual à altura de entrada da água. Por defeito, o parâmetro de controlo da válvula deve ser regulado com um valor igual à altura máxima de água no RNV. Se existir uma FCV regulada para uma determinada consigna de caudal a montante de uma PSV, e se a PSV for activada, fechando de modo a garantir um valor mínimo de pressão a montante, a capacidade de transporte a montante diminui. No caso do Epanet, o programa emite uma mensagem de aviso do tipo: `“warning message: FCV 209 open but cannot deliver flow”` pois a FCV não consegue debitar o caudal consignado, aviso que não constitui qualquer erro na modelação.

4.3.10.7 Cuidados especiais relativos à inserção de válvulas num modelo

Devido ao modo como as válvulas são modeladas, deve ter-se em atenção as seguintes regras quando se inserem novas válvulas num modelo:

- uma PRV, PSV ou FCV não pode ser ligada directamente a um reservatório de nível fixo ou a um reservatório de nível variável (utilize sempre uma determinada extensão de conduta para separar os dois componentes);
- duas PRVs não podem partilhar a mesma conduta de jusante nem podem estar ligadas em série;
- duas PSVs não podem partilhar a mesma conduta de montante nem podem estar ligadas em série;
- uma PSV não pode ser ligada ao nó de jusante de uma PRV.

4.3.11 Geração da representação da infra-estrutura física num modelo

Os dados de cadastro constituem a informação de base para a construção de um modelo. Podem estar armazenados sob diversas formas, desde o formato numérico, ao suporte gráfico em papel, e ao suporte gráfico digital em CAD ou em SIG. Este último consiste na combinação entre o formato gráfico e um conjunto de dados de cadastro estruturados e armazenados numa base de dados.

O traçado-base do modelo da rede pode ser obtido no próprio ambiente de trabalho do *software* de simulação, sobretudo se for possível efectuá-lo tendo por base uma imagem de fundo da cartografia da zona, ou através da importação de ficheiros de cadastro em CAD ou SIG (sistema de informação geográfica).

No caso de o traçado-base do modelo da rede, composto por nós e troços, ser gerado de forma automatizada a partir de outro software, deve ser feita a verificação da consistência do traçado da rede, sobretudo em termos de intersecções de condutas. Os restantes elementos físicos que constituem a rede, como sejam as válvulas, bombas e reservatórios, são inseridos no próprio ambiente de trabalho do simulador.

Embora todo o desenho da rede deva ser construído à escala, os pontos com maior complexidade topológica, como as instalações elevatórias, os reservatórios, as captações, poderão ser desenhados no modelo a uma escala ampliada, para uma maior legibilidade da representação gráfica. Neste caso, os comprimentos introduzidos nas propriedades das condutas deverão naturalmente ser os comprimentos exactos.

4.3.11.1 Geração manual dos dados

A maneira mais simples e mais tradicional de gerar a descrição da infra-estrutura física num modelo de simulação é de forma manual. Antes do advento dos ambientes computacionais gráficos, os modelos eram criados e manipulados exclusivamente através de ficheiros de texto contendo uma descrição normalizada, normalmente através de tabelas contendo a lista e as características de cada tipo de componente do sistema.

Essa forma tabular de lidar com os dados foi retida até à actualidade, e a maioria dos simuladores disponíveis no mercado continuam a suportar formatos desse tipo, que essencialmente

continuam a permitir a analistas com alguma experiência a mecanização das tarefas de *input*.

É, por exemplo, o caso do simulador Epanet 2.0 que – embora tenha evoluído para um ficheiro de simulação em formato binário (os ficheiros .net), contendo toda a informação, tanto numérica como gráfica, necessária ao modelo e ambiente de modelação – manteve o formato de texto que utilizava desde as primeiras versões do programa (os ficheiros .inp), e que constitui mesmo um *standard* de facto a nível mundial, utilizado por vários dos outros programas de simulação actualmente disponíveis no mercado.

Com as capacidades de interface gráfica hoje em dia vulgarizadas na maioria dos simuladores, construir um modelo manualmente passou a ser uma tarefa muito mais simplificada e intuitiva, efectuada de forma gráfica em ambientes semelhantes aos que se podem encontrar nos programas de CAD ou de desenho técnico. Os elementos são criados a partir de bibliotecas ou barras de ferramentas e dispostos graficamente no écran. É assim possível criar e parametrizar modelos muito rapidamente, sobretudo quando não envolvem um grande número de nós e troços.

Frequentemente são combinadas as duas formas de geração manual, começando por criar graficamente a topologia, para depois inserir as características técnicas – os dados numéricos – de forma tabular, seja no próprio ambiente de modelação, seja através do já referido ficheiro de texto.

O desenho da topologia no ambiente gráfico é grandemente facilitada pela possibilidade oferecida pelos actuais simuladores de carregar como pano de fundo a cartografia desenhada ou um ortofotomapa (Figura 4.6). Tal permite uma eficaz orientação e localização dos pontos de referência e um desenho rápido e seguro das tubagens e restantes elementos.

Quando o desenho é criado sobre um suporte deste tipo, com as coordenadas correctamente definidas e utilizando uma referenciação real, pode utilizar-se a capacidade de geração automática dos comprimentos das condutas (auto-comprimento) que a maioria dos simuladores oferecem, e assim reduzir o volume do trabalho de introdução de dados numéricos e a possibilidade de erro, aumentando igualmente a fiabilidade dos valores gerados. Tal implica, no entanto, que as condutas sejam desenhadas com rigor e respeitando as curvas e vértices do seu traçado. É necessário igualmente que a escala do mapa, reflectida no sistema de coordenadas fornecido ao simulador, seja criteriosamente estabelecida. A utilização da opção de auto-

comprimento deverá sempre ser sujeita a um controlo de qualidade sistemático do resultado final.

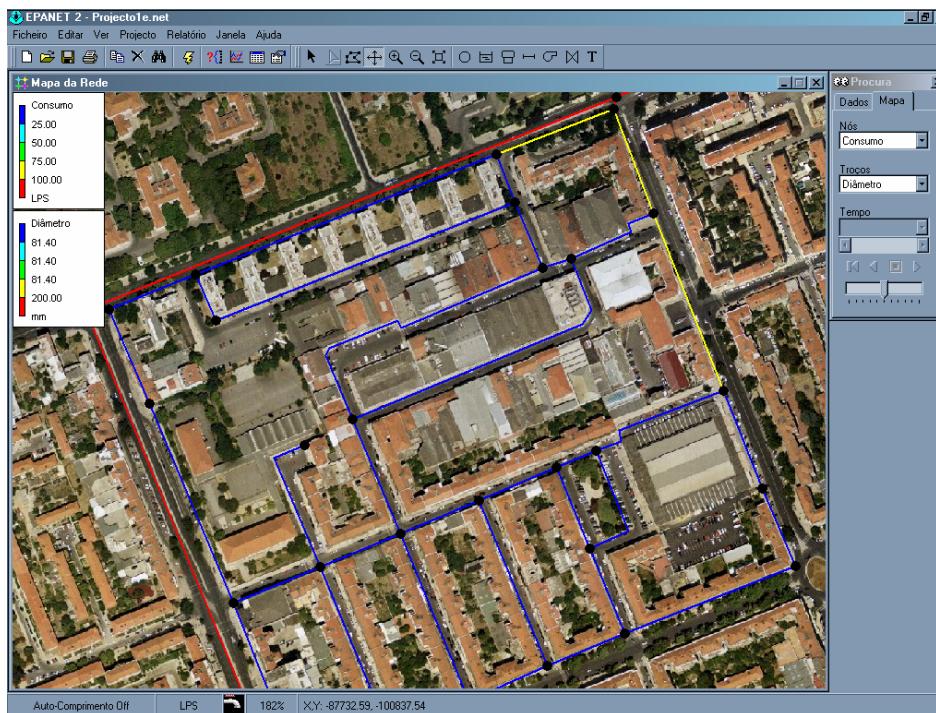



Figura 4.6 – Modelo de rede desenhado directamente sobre um ortofotomapa, carregado como imagem de fundo.

4.3.11.2 Geração dos dados a partir de desenhos CAD

A representação e registo da informação cadastral sobre condutas utilizando o suporte CAD (ou *Computer-Aided Design*), é uma das soluções informáticas disponíveis e bastante utilizadas pelos projectistas e entidades gestoras. Trata-se de um dos formatos mais comuns para suporte das telas de projecto e telas finais das obras realizadas na rede.

Referem-se seguidamente alguns aspectos importantes a ter em consideração para o traçado de uma rede em CAD, assim como a metodologia recomendada para converter os ficheiros .dxf resultantes em ficheiros de dados de modelação em formato .inp,

o formato de texto (ASCII) nativo do Epanet 2.0, compatível com muitos dos programas de simulação actualmente disponíveis.

Os desenhos da infra-estrutura em CAD não são usualmente concebidos com a preocupação de utilizar posteriormente a informação gerada num modelo de simulação. Quando se considera esta opção, devem ser tidos em conta determinados aspectos, em termos de traçado, por forma a que a representação esteja o mais próximo possível da realidade e que as modificações a introduzir no modelo para completar o traçado da rede sejam mínimas.

A partir de um desenho em CAD, apenas é possível obter o traçado da rede em termos de condutas e nós. Outros elementos como válvulas, bombas e reservatórios têm que ser introduzidos mais tarde, utilizando o próprio *software* de simulação.

Os troços de conduta deverão ter, na representação em CAD, características homogéneas (diâmetro e material) ao longo do seu comprimento. Como foi referido anteriormente, os troços de conduta têm uma correspondência física, enquanto que os nós que os delimitam são entidades fictícias, podendo muito embora representar pontos notáveis existentes.

Na inserção de nós nos desenhos CAD a partir dos quais se pretende criar ficheiros de modelação deverão ser respeitadas as regras anteriormente citadas (4.3.3). Haverá de prestar particular atenção ao caso da ocorrência de intersecções de condutas, nos que diz respeito aos seguintes aspectos importantes:

- distinguir a situação em que o cruzamento corresponde a uma intersecção efectiva daquela que representa uma passagem inferior ou superior de condutas;
- representar adequadamente o início e o final de troços interligados.

A conversão de ficheiros CAD para ficheiros de dados de modelação, utilizando o formato *standard* .inp do Epanet 2.0, é detalhada no Anexo B.

4.3.11.3 Geração dos dados a partir de um SIG

Os sistemas de informação geográfica (SIG) são cada vez mais o principal repositório da informação relativa à infra-estrutura física e mesmo ao seu funcionamento e utilização.

Os SIG de sistemas de abastecimento de água, quando completamente implementados, contêm uma grande parte da

informação que é necessária para, num modelo de simulação, descrever as condutas e grande parte das válvulas – em termos não só topológicos (relativos à conectividade de troços e nós), mas também geométricos (diâmetros e comprimentos de condutas, diâmetros de válvulas) e altimétricos (cotas de nós).

Têm ainda a possibilidade de conter informação sobre o material, idade, história de reparações e outros elementos que possibilitam uma estimativa do coeficiente de rugosidade, essencial para a tradução do comportamento hidráulico, bem como de parâmetros importantes para a simulação de qualidade da água.

Com maior flexibilidade ainda do que no caso dos desenhos CAD mencionados em 4.3.11.2, a exportação da descrição de condutas e válvulas a partir de um SIG, com o formato lido por um determinado simulador, pode gerar uma grande quantidade de informação e dar um grande contributo ao processo de construção de um modelo.

As soluções particulares correm "do lado do SIG", e são portanto muito dependentes das suas capacidades, das características do *software* em que está implementado, e do formato de modelação que se pretenda reproduzir.

Muitos dos cuidados gerais a ter com a exportação de dados a partir de desenhos CAD (4.3.11.2) são aplicáveis. Os aspectos mais importantes a tomar em consideração, no que diz respeito à descrição da infra-estrutura física, são os seguintes:

- ► deve procurar-se concentrar esforços numa exportação correcta sobretudo dos elementos sobre condutas e válvulas de rede;
- ► a descrição das instalações elevatórias, reservatórios, etc., pode, e frequentemente deve, ser feita individualmente no modelo; a sua descrição no SIG pode não ter obedecido aos critérios de representação, detalhe e rigor requeridos pelo modelo; e o número de instalações deste tipo numa rede é habitualmente pequeno, onerando pouco a sua descrição no modelo por via não-automatizada[16].

---

[16] Exceptuam-se os sistemas de adução pura com muitos pontos de entrega – como os sistemas multi-municipais de produção e transporte – em que o número destas instalações pode ser por forma a aconselhar a adopção, no SIG, de

- o estabelecimento dos nós de modelação deve ser individualizado, no SIG, através de um *layer* próprio; um SIG pode ser formulado com topologias de natureza diferente (troço-troço, troço-nó, nó-nó), ou com um grau de detalhe pouco conveniente para o modelo, o que faz com que seja necessário indicar exactamente quais os nós a considerar; por outro lado, os critérios de localização dos nós de modelação (ver 4.3.3) podem não coincidir com aqueles que foram utilizados na geração do SIG;
- a altimetria deverá fazer parte dos dados exportados; caso não exista no SIG, deverá ser introduzida neste, aproveitando os referidos nós de modelação, e posteriormente exportada; deverá evitar-se introduzir a altimetria directamente no modelo, quando não existe no SIG, pois tal poderá criar situações indesejáveis de inconsistência entre os dois sistemas; no caso limite, não sendo possível a exportação, deverá ser introduzida simultaneamente nos dois sistemas;
- a exportação de dados de um SIG para um modelo não dispensa, naturalmente, um controlo de qualidade eficaz do lado do modelo, nomeadamente no que diz respeito à conectividade dos troços.

4.3.11.4 Carregamento de dados adicionais sobre o cadastro – verificação da conectividade

Apesar dos processos acima descritos facilitarem o traçado da rede, é necessário efectuar sempre uma verificação do traçado que foi importado, sobretudo em termos de intersecções entre condutas e na localização de válvulas.

4.3.12 Manual do modelo

4.3.12.1 Aspectos gerais

O Manual do Modelo é uma memória descritiva que fundamenta todas as opções, métodos de cálculo, estimativas e decisões tomadas no decurso do desenvolvimento e manutenção do modelo. Nessa acepção, deve considerar-se como parte

---

critérios de representação, detalhe e rigor que viabilizem a exportação automatizada dos seus elementos descritivos para o modelo.

integrante do modelo, uma espécie de “diário de bordo” essencial para partilhar entre todos os membros da equipa de modelação, e transmitir a todos os potenciais utilizadores, os conhecimentos específicos sobre o modelo ou conjunto de modelos em causa.

O Manual do Modelo deve conter toda a informação considerada relevante para o fim acima descrito. No entanto, deve pelo menos incluir os dois instrumentos que se passa a descrever: as Fichas Técnicas de Instalações Especiais e as Fichas Técnicas de Rede.

4.3.12.2 Fichas técnicas de instalações especiais

A modelação dos conjuntos de elementos físicos reunidos nas chamadas instalações especiais – tais como válvulas de controlo, reservatórios, estações elevatórias ou captações – constitui frequentemente a parte mais complexa de um modelo, quer em termos da sua representação, quer em termos das regras de controlo operacional que lhe estão normalmente associadas.

Face à importância e complexidade operacional destes pontos para a modelação de um sistema, importa coligir e estruturar toda a informação relevante. Deste modo, a descrição de todas as instalações envolvendo reservatórios, captações, pontos e entrega, válvulas de manobra operacional e bombas deverá sempre ser detalhada em desenho apropriado e todas as características, não só físicas como operacionais, traduzidas e registadas em suporte próprio. A forma preconizada para essa tarefa é o recurso às fichas técnicas de instalações especiais.

A individualização deste tipo de elementos justifica-se por várias razões:

- É frequente a informação cadastral estar num suporte diferente, para este tipo de componentes, daquele que contém a informação sobre a rede (condutas e válvulas de seccionamento), mesmo quando se trata de suporte informatizado (CAD ou SIG); esse suporte raras vezes se encontra organizado e sistematizado, havendo necessidade disso para o modelo.
- É também frequente ser necessário confirmar especificamente, e deixar documentadas, todas as características geométrica de reservatórios, curvas de bombas, regras de operação, etc.; o suporte em ficheiro de simulação não reserva habitualmente espaço para a sistematização dessa informação complementar.

- O número deste tipo de instalações, por sector de modelação de dimensão típica, é raramente tão elevado que torne impeditiva a tarefa de preparar Fichas Técnicas de modelação.

Estas fichas devem ser permanentemente actualizadas, por forma a constituir a base de dados para as sucessivas actualizações do modelo. No Anexo C apresenta-se um exemplo de uma ficha técnica padronizada, a qual se encontra organizada de acordo com os seguintes tópicos:

1. **Descrição** – identificação da instalação especial, através da respectiva abreviatura e do sector a que pertence, e descrição resumida dos reservatórios, das captações, das estações elevatórias e/ou das válvulas que possam integrá-la, bem como do seu funcionamento operacional.
2. **Configuração topológica** – representação esquemática do ponto de abastecimento com a respectiva legenda.
3. **Reservatórios: geometrias e cotas** – descrição da geometria e das alturas de água de cada reservatório (ou célula).
4. **Válvulas** – descrição dos tipos de válvulas existentes e do respectivo parâmetro de controlo.
5. **Estações elevatórias/sobrepressoras e grupos submersíveis** – identificação de cada grupo elevatório, descrição do tipo (i.e., velocidade fixa ou variável), da respectiva curva característica (ID e pares de valores de caudal e altura de elevação) ou da potência da bomba (no caso de não ser fornecida uma curva de bomba) e indicação, no caso da bomba ser de velocidade variável, da velocidade de rotação relativa (factorização adimensional relativa ao respectivo valor nominal).
6. **Captações** – identificação de cada captação através do respectivo ID, nível de água estático, ID da bomba submersível, ID, comprimento e diâmetro da conduta de compressão.
7. **Regras de operação** – descrição do funcionamento operacional de acordo com os cenários de época baixa, época média e época alta, em termos de níveis de operação, regulações de caudal e controlos.
8. **Comentários** – enumeração de outros aspectos importantes sobre a operação e configuração do ramal ou do ponto de abastecimento.

Os vários parâmetros devem ser especificados nas unidades escolhidas para o modelo e nos formatos requeridos pelo *software* de simulação.

4.3.12.3 Fichas técnicas de rede

As fichas técnicas de rede permitem coligir informação sobre a forma como foram gerados e carregados no modelo os dados descritivos das propriedades dos nós, das tubagens e das válvulas da rede. Permitem avaliar a qualidade da informação recolhida, nomeadamente das cotas dos nós, dos comprimentos, dos diâmetros e das rugosidades das tubagens e dos diâmetros e do estado das válvulas.

As fichas técnicas de rede, tal como as fichas técnicas das instalações especiais, constituem parte integrante do manual do modelo. Devem ser preenchidas pela equipa responsável pelo desenvolvimento do modelo e ser complementadas sempre que a equipa considere importante.

As fichas técnicas de rede devem estar permanentemente actualizadas e devidamente identificadas com a data da última actualização e com a designação do(a) técnico(a) que procedeu ao seu carregamento ou actualização.

A cada modelo corresponde um conjunto de fichas técnicas de rede, tal como um conjunto de fichas técnicas das instalações.

4.4 Descrição de consumos e caudais

4.4.1 Quantificação de caudais e consumos num sistema de abastecimento

As solicitações a um sistema de abastecimento de água são os consumos de água por parte dos diversos grupos de utilizadores e as perdas físicas de água que ocorrem no conjunto de condutas e restantes componentes. A sua estimativa constitui a tarefa mais difícil e habitualmente mais trabalhosa do processo de desenvolvimento de um modelo de simulação, uma vez que os consumos humanos têm um comportamento de natureza estocástica, tanto no tempo como no espaço, e são invariavelmente a maior fonte de incerteza associada ao modelo.

O consumo de água numa rede de distribuição inclui o consumo humano – doméstico, comercial, industrial, as utilizações públicas

de água para rega de espaços verdes ou lavagem de ruas, e as restantes utilizações autorizadas, bem como eventuais utilizações não autorizadas – e as perdas de água devidas a fugas, roturas e extravasamentos.

Assim, assume particular importância o cuidado posto na obtenção das estimativas de consumo, e a adopção de métodos de quantificação e atribuição de consumos aos nós da rede que facilitem a sua actualização permanente e flexibilizem o cálculo e a utilização do modelo.

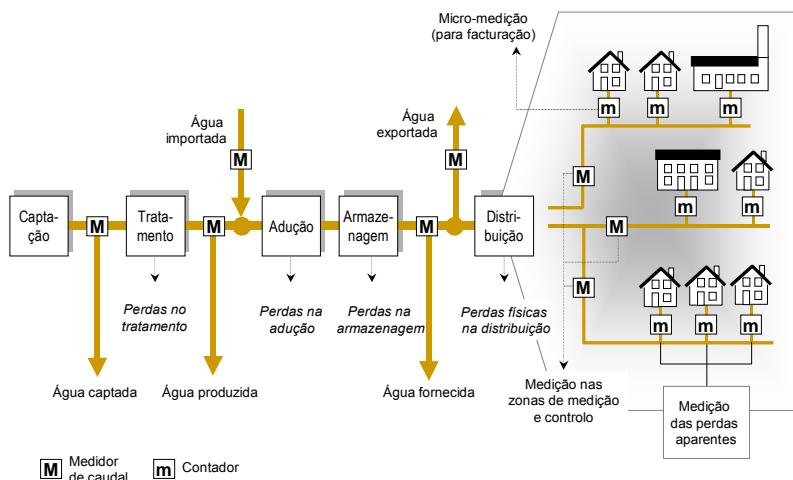



Figura 4.7 – Principais elementos dos sistemas de abastecimento de água, com os componentes do balanço hídrico e localização dos pontos de medição de caudal.

Na realidade, a medição fiável dos principais volumes de água geridos deverá constituir uma parte integrante das funções de abastecer e distribuir água, não só para efeitos de modelação, mas sobretudo pelo incremento das capacidades de análise e gestão da oferta e da procura, incluindo a avaliação de perdas.

A medição dos caudais captados, produzidos, aduzidos e armazenados (incluindo os importados e exportados) pelo sistema, bem como dos caudais entrados ou saídos em cada sector de distribuição ou zona de medição e controlo é essencial para o cálculo adequado dos balanços hídricos. Os pontos de medição mais importantes estão identificados no esquema da Figura 4.7.

Embora a principal finalidade da medição doméstica seja a facturação dos caudais vendidos, a exactidão das medidas e a eficácia do sistema de leitura são igualmente de importância crucial para o cálculo dos balanços hídricos.

Um primeiro indicador importante é o consumo médio global. Existem várias formas de o determinar, das quais se referem como mais comuns as seguintes:

- por macro-medição, ou medição directa dos volumes de água fornecida à rede através de grupos elevatórios, reservatórios e/ou condutas adutoras;
- por micro-medição, ou medição dos volumes de água utilizados nos pontos de consumo;
- por estimação, com base no tipo de ocupação urbanística, no número de habitantes servidos, nas indústrias abastecidas, no estado de conservação da rede, etc..

As duas primeiras formas são complementares e não alternativas, dado que só através da comparação entre os valores obtidos pela macro-medição e pela micro-medição é possível contabilizar as perdas do sistema de distribuição (perdas físicas e consumos não medidos), e actuar em conformidade.

Na prática, é comum a existência de registos mensais de micro-consumos, e a inexistência ou escassez de equipamento que permita quantificar com exactidão os volumes de água fornecidos à rede.

Por norma, os registos de micro-consumo são insuficientemente consistentes para se poderem tirar conclusões à escala do mês, por diversos motivos: leituras efectuadas em datas diferentes consoante a área de leitura, avarias dos contadores, consumos estimados por impossibilidade de leitura, entre outros. No entanto, os registos de micro-consumo permitem determinar, com rigor suficiente, consumos médios semestrais ou anuais medidos, para a totalidade da rede.

No caso, ainda relativamente frequente, da falta de dados de confiança, é necessário recorrer à estimação. Nesta eventualidade, há que atender cuidadosamente à definição de capitação utilizada na(s) fonte(s) bibliográfica(s) onde são recolhidos os valores.

As três formas mais comuns de definir capitação são as seguintes:

- razão entre o consumo doméstico médio diário medido e o número de habitantes;
- razão entre o consumo total médio diário medido(incluindo todos os tipos de consumidor) e o número de habitantes;
- razão entre o volume médio de água fornecido diariamente a rede e o número de habitantes.

Qualquer das três formas deverá ser calculada utilizando, como estimativa para o número de habitantes, tanto a população *residente* como a população *presente*, quando for previsível que existam diferenças significativas entre ambas.

As diferenças dos valores de capitação definidos a partir de uma ou de outra das vias referidas não é de modo nenhum desprezável, havendo que fazer as conversões necessárias em face dos objectivos em vista.

4.4.2 Sistemas de facturação e gestão de clientes

Um grande número de entidades gestoras em Portugal e noutros países utiliza sistemas informatizados para gestão de clientes e registo e facturação de consumos de água. Estes sistemas registam e gerem toda a informação relevante relativa aos clientes e aos locais de consumo de água do sistema de abastecimento. Os dados residem em bases de dados, armazenadas na própria entidade gestora ou no centro de processamento de dados da empresa que presta o serviço.

Estes sistemas, que são utilizados essencialmente pelas unidades comerciais da entidade gestora, contêm todavia uma grande quantidade de informação relevante para fins de engenharia, que raramente é aproveitada na sua plenitude. No sentido de tirar o melhor partido possível dessa informação para a construção de modelos, é importante possuir um entendimento do tipo e estrutura dos dados contidos nestes sistemas. Procede-se abaixo a uma descrição simplificada, com o objectivo de introduzir os principais conceitos e habilitar o gestor de um modelo a procurar o melhor interface possível entre este e o sistema de facturação ou de gestão de clientes. Estes conceitos serão particularmente úteis quando forem discutidos os métodos de atribuição de consumos aos nós do modelo baseados nos dados de facturação (ver 4.4.5, pág. 121).

Nas implementações mais comuns, os dados que caracterizam o ponto de consumo dividem-se genericamente nos seguintes grupos: identificação do cliente; dados geográficos; dados de

leitura; e dados de facturação. Descrevem-se seguidamente os principais dados registados nestes grupos.

- Identificação do Cliente
    - Código de Cliente – um código alfanumérico único atribuído a cada cliente do sistema.
- Dados Geográficos
    - Código do Distrito
    - Código do Concelho
    - Código da Freguesia – notar que as freguesias em que se divide o sistema de clientes podem não coincidir necessariamente com as freguesias administrativas.
    - Código de Lugar – um código alfanumérico único atribuído a cada lugar, dentro de uma freguesia.
    - Código de Rua – código alfanumérico da rua onde está situado o local de consumo, e que consistem num número único atribuído a cada rua do município (duas ruas com o mesmo nome, em freguesias diferentes, terão códigos de rua diferentes).
    - Número de Polícia – o número de polícia do edifício (ou porta) onde está situado o local de consumo; notar que nem todos os edifícios têm número de polícia, uma vez que decorre algum tempo entre a construção de um edifício e a atribuição do referido número (ver ainda o registo "Duplicador", abaixo); os locais sem número de polícia são habitualmente identificados com valores particulares deste código (p.ex., iguais ou superiores a 90000).
    - Duplicador – quando existem números de polícia duplicados, identificados por uma letra adicional (p.ex., 10a, 10b, 10c) , este campo regista a letra adicional.
    - Escada, andar e lado – em edifícios de apartamentos, este campo regista a escada, o andar e o lado (posição relativa às escadas, esquerdo ou direito) do local de consumo (p.ex,. 3 DTO)
    - Código de Local de Consumo – um código alfanumérico único atribuído a cada local de consumo.

- Código Postal – este campo regista apenas os 4 dígitos principais do Código Postal nacional, e não os dígitos suplementares ou o nome do lugar.

- Dados de Leitura

  - Roteiro – o código alfanumérico do roteiro de leitura a que pertence a área de leitura onde está situado o local de consumo.
  - Área – o código alfanumérico da área de leitura onde está situado o local de consumo;
  - Código de arruamento – um segundo código alfanumérico do local de consumo, interno a cada área de leitura, relacionado com a sequência de leitura.

- Dados de Facturação

  - Um conjunto de dados relativos à facturação do cliente ou do local de consumo em causa, que incluem os consumos facturados nos últimos períodos de facturação, consumo acumulado, o tarifário aplicado e o tipo de leitura, entre outros.

Dos dados acima referidos, o *código de local de consumo* é o de maior interesse para a solução a adoptar para o carregamento dos modelos de simulação. Esse código identifica univocamente o local de consumo, utilizando os elementos identificativos geográficos através de uma chave constituída da forma que se esquematiza na Figura 4.8.

A chave está dividida em duas partes: a Chave Geográfica Horizontal, que contém a referência geográfica completa da porta de referência do edifício onde se situa o local de consumo, e a Chave Geográfica Vertical, que identifica verticalmente este no interior do referido edifício.

Chave Geográfica Horizontal | C. G. Vertical

DD CCC FFF LL RRRRR NNNNN DD XXXXXX

- Cód. Distrito (x2)
- Cód. Concelho (x3)
- Cód. Freguesia (x3)
- Cód. Lugar (x2)
- Cód. Rua (x5)
- Nº. Polícia (x5)
- Duplicador (x2)
- Escada, andar e lado (x6)

Figura 4.8 – Chave do código de local de consumo.

A entidade gestora acede à base de dados através de uma aplicação de consulta tipicamente com um conjunto de menus e de *queries* pré-definidos, que permite consultar os dados individuais e de facturação dos consumidores ou dos locais de consumo, e ainda efectuar um conjunto limitado de *queries* estatisticos simples, tais como os totais de consumo por área de leitura ou por tipo de consumidor. Aplicações mais recentes permitem uma maior flexibilidade no tipo de *queries* que é possível efectuar. È comum poder extrair quadros totais mensais ou anuais para formatos de texto ou de *software* de uso geral, tal como folhas de cálculo.

4.4.3 Como são especificados os consumos num modelo

A especificação dos consumos é um dos principais problemas que se levantam no processo de construção de um modelo de simulação. Apresentam-se neste ponto as diferentes formas de especificar os consumos nos actuais simuladores, incluindo tanto a sua distribuição espacial ao longo da rede como a variação temporal e o modo de traduzir vários tipos de comportamentos simultâneos.

4.4.3.1 Concentração de consumos nos nós

Embora, do ponto de vista da rede, os consumos estejam distribuídos ao longo das condutas, através dos ramais de entrega, e seja igualmente expectável que as fugas se distribuam de forma aproximadamente contínua, os modelos de simulação empregam habitualmente a simplificação justificável de

representar o consumo como estando concentrado nos nós que delimitam as condutas.

É convencionado que os consumos que ocorrem em cada semi-comprimento de uma conduta são concentrados no nó respectivo. Na Figura 4.9, c_1 a c_5 são os consumos que se verificam nos ramais domiciliários ligados ao longo da conduta, e q_i e q_f são os consumos acumulados nos nós i e f, que delimitam a conduta. Os consumos c_1 a c_3 são atribuídos ao nó i, uma vez que estão mais próximos deste, enquanto que os consumos c_4 e c_5 são atribuídos ao nó j.

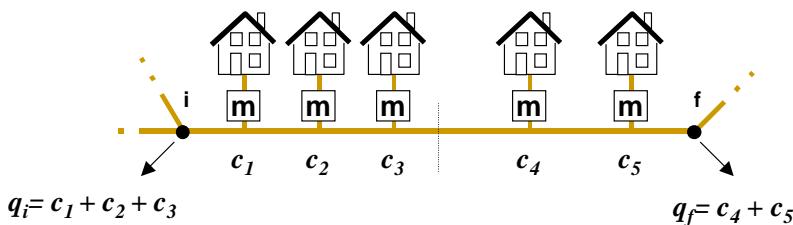



Figura 4.9 – Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final (a linha a tracejado marca o ponto médio da conduta).

4.4.3.1.1 Efeitos da simplificação

É importante reflectir sobre alguns aspectos relacionados com esta simplificação e que podem influir no modo de aplicação e na qualidade dos resultados de um modelo. Na realidade, o consumo ocorre ao longo das condutas, através dos ramais de ligação, e poder-se-ia representar de forma mais precisa, seja considerando um nó para cada ramal de ligação, seja considerando o consumo como uniformemente distribuído ao longo das condutas pela sofisticação das equações representativas do escoamento ao longo destas.

Qualquer das soluções oneraria o modelo de forma significativa – a primeira na dimensão, e a segunda pela complexidade matemática significativamente agravada – com um incremento discutível na qualidade do modelo, pelas razões expostas em 4.4.4.

A simplificação adoptada tem como consequência que a perda de carga calculada ao longo de um troço de conduta pode ser subestimada ou sobrestimada (dependendo do sentido do escoamento), por ser calculada com um caudal respectivamente inferior ou superior ao que efectivamente circula na conduta.

Esse efeito é tanto maior quanto mais a distribuição de consumos ao longo da conduta se afastar de uma distribuição uniforme. Todavia, esse erro não é por norma significativo, a não ser que se dê efectivamente uma distribuição muito desigual, ou que exista um ou mais grandes consumidores (ou grandes concentrações de consumo). Nestes casos, a solução passa pela introdução de nós adicionais.

4.4.3.1.2 Caudal de perdas

Nos sistemas de distribuição urbana comuns, com uma densidade de ramais domiciliários média a elevada, a hipótese simplificativa de considerar a distribuição espacial das perdas proporcional à dos consumos é aceitável, pelas seguintes razões:

- é geralmente aceite que a maior parte das perdas físicas num sistema de distribuição urbano ocorre através dos acessórios dos ramais de ligação (Hirner, Alegre e Coelho, 1999);
- se for admitido que quanto maior for o consumo, maior será a extensão e número de acessórios dos ramais, a proporcionalidade directa entre o consumo e as perdas é uma suposição razoável.

Se não houver macro-medição (situação em que é mais comum admitir-se esta hipótese simplificativa) ou esta não for fiável, a percentagem de perdas é em geral mal conhecida – os erros cometidos na estimação das perdas, e da sua variabilidade ao longo do dia devida às variações de pressão, são muito provavelmente tanto ou mais importantes que os erros causados pela introdução da simplificação referida.

4.4.3.2 Consumo-base

A forma habitual de especificar os consumos num modelo de simulação consiste em atribuir a cada nó um valor nominal, também designado por *consumo-base*. Na Figura 4.10, o caudal total fornecido à rede é Q e os consumos-base nos nós 1 a 7 são q_1 a q_7.

O consumo-base representa o consumo acumulado no nó. No exemplo da Figura 4.10, o nó 3 não possui consumo-base, uma

vez que nos semi-comprimentos de conduta que lhe são adjacentes não há qualquer consumo. Note-se também que o nó 2 tem um consumo ligado directamente ao nó. Trata-se de um grande consumidor, e o nó 2 foi introduzido pelo modelador justamente para poder individualizar este consumo-base, que será medido individualmente.

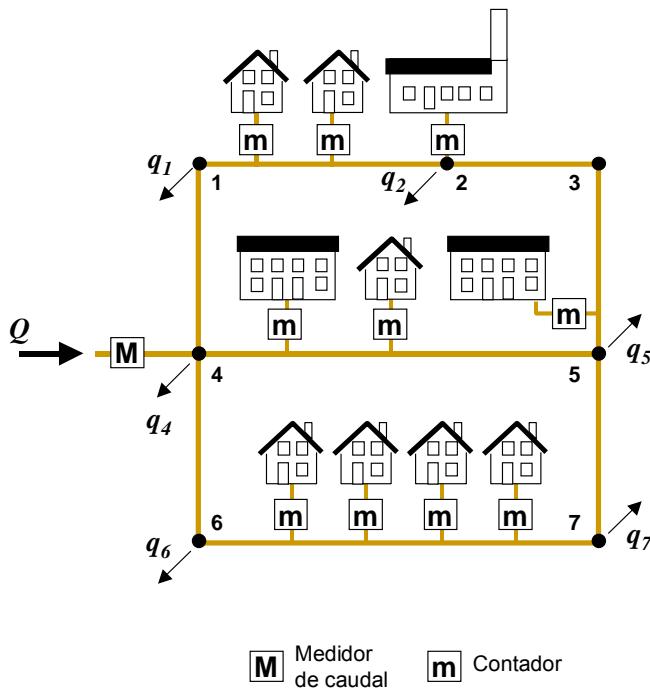



Figura 4.10 – Caudal total fornecido *Q* e consumos-base q_1 - q_7, numa rede de distribuição.

O consumo-base concentrado no nó pode ser especificado em termos de:

(i) um valor dimensional, ou seja uma estimativa (em unidades de caudal), para o período em análise, do valor médio[17] do

[17] Ou outro qualquer valor representativo da análise pretendida, como p.ex. uma

consumo para o conjunto de consumidores cujo consumo é representado pelo nó. A soma de todos estes valores é o consumo médio[18] total da rede.

(ii) um valor adimensional, expresso como fracção do caudal total entrado na rede, que é obtida dividindo o valor referido em (i) pelo consumo total da rede, para o período em análise. A soma de todas estas fracções é a unidade.

4.4.3.3 Factor multiplicativo do consumo

No caso de uma simulação estática, a introdução dos consumos-base na modalidade (i) configura completamente o modelo em termos de consumo. Na modalidade (ii), será ainda necessário conferir escala aos pesos que traduzem o consumo-base nos nós, por via de um factor multiplicativo global.

Os modelos de simulação permitem habitualmente configurar um *factor multiplicativo do consumo*, que possibilita ajustar em bloco todos ou alguns dos consumos-base nodais. No caso (i), esse factor só seria necessário se se pretendesse corrigir os valores introduzidos, ou aplicar-lhes um factor de ponta.

Por exemplo, se o consumo-base representasse um valor médio diário, poderia utilizar-se o factor multiplicativo para obter a descrição dos consumos na situação de ponta diária. O mesmo se poderia passar em termos de consumos médios/máximos semanais, mensais, anuais ou numa situação projectada no futuro.

No caso (ii), de o consumo ser configurado através de fracções da unidade (ou pesos), traduzindo assim apenas uma distribuição espacial do caudal total entrado no sistema, o factor multiplicativo do consumo é, em simulação estática, utilizado para conferir escala, multiplicando cada fracção nodal pelo caudal total entrado.

Neste caso, pode ainda utilizar-se o factor multiplicativo para operar as mesmas modificações referidas para o caso (i), especificando um valor que é o produto do caudal total entrado pelo factor de ponta ou pela correcção pretendidos.

---

determinada ponta.

[18] Ver nota anterior.

4.4.3.4 *Consumos compostos – as categorias de consumo*

Os actuais simuladores permitem especificar, em cada nó, várias *categorias de consumo*, que são cumulativas entre si – o consumo total em cada nó é a soma do consumo especificado para as diferentes categorias, multiplicado pelo factor multiplicativo dos consumos (cujo valor por defeito é 1). A maioria dos simuladores permite inclusivamente especificar um factor multiplicativo dos consumos para cada categoria. Deste modo,

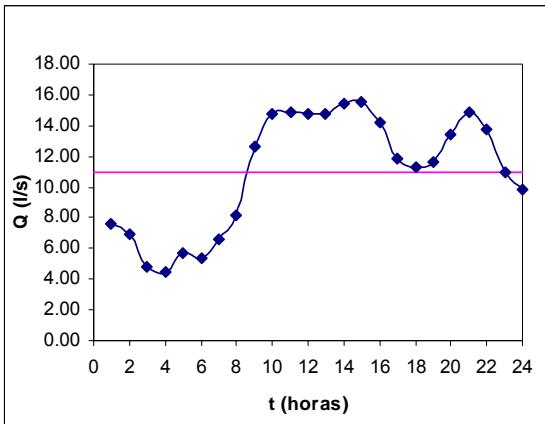
$$q_i = \sum_{k=1}^{N_{cat}} F_k q_{i,k} \qquad (11)$$

em que q_i é o consumo-base no nó i, N_{cat} é o número de categorias de consumo definidas, F_k o factor multiplicativo de consumo para a categoria *k* e $q_{i,k}$ o consumo-base no nó i para a categoria *k*.

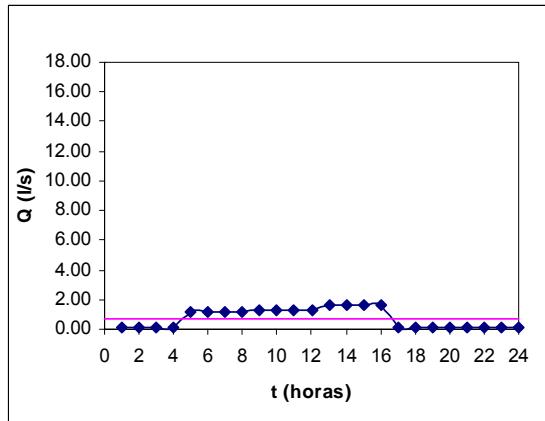
Quando é especificada mais do que uma categoria de consumo em um ou mais nós, diz-se que esses nós possuem *consumos compostos*.

Através das categorias de consumo é possível, por exemplo, separar o consumo doméstico, comercial, industrial ou de serviços, individualizar um grande consumidor do restante consumo associado ao nó, distinguir o consumo facturado do consumo medido não facturado, ou tratar de forma independente as estimativas de perdas.

As diferentes categorias podem assim ser individualmente ajustadas, em função dos objectivos e condicionantes das estimativas correspondentes.

4.4.3.5 *Padrões temporais de consumo – simulação em período alargado*

No caso de se pretender simular um cenário em que o consumo varia ao longo do tempo, utiliza-se a simulação em *período alargado*, também designada por simulação *dinâmica*[19].

Com a vulgarização das capacidades de simulação em período alargado, por um lado, e com a tónica actual frequentemente

---

[19] Ver Nota 3 na pág. 14.

colocada em objectivos de modelação só atingíveis com esse tipo de simulação – como sejam a simulação de qualidade da água, a optimização de bombeamentos ou o controlo operacional – este tipo de simulação é hoje em dia tão ou mais utilizado do que a simulação estática.

O consumo humano de água – que como já se viu constitui a solicitação primordial dos sistemas de abastecimento – é por natureza estocástico e muito variável no tempo. A forma de incorporar essas variações temporais consiste em introduzir padrões de variação do consumo, que não são mais do que sequências de factores multiplicativos, um por cada passo temporal da simulação hidráulica. Diferentes *padrões de consumo* traduzirão, desta forma, diferentes comportamentos.

(a)

(b)

Figura 4.11 – Padrões de consumo para duas categorias diferentes: (a) um consumo doméstico e (b) um consumo industrial.

Assim, o consumo em cada nó, para determinado passo temporal, é dado pelo produto do consumo-base no nó pelo valor do padrão de consumo escolhido, para o passo temporal em causa:

$$q_i^t = P^t q_i \tag{12}$$

em que q_i^t é o consumo no nó i no instante t, q_i é o consumo-base no nó i e P^t é o valor do padrão de consumo no instante t.

No caso de existirem várias categorias de consumo (Figura 4.11), haverá um padrão de consumo por cada categoria (embora o mesmo padrão possa ser utilizado por mais do que uma categoria). É na simulação em período alargado, com a utilização de padrões de consumo diferenciados, que a manipulação de categorias de consumo revela a sua potencialidade e flexibilidade para a representação de comportamentos de consumo sobrepostos.

Generalizando, para o caso em que tenham sido definidas N_{cat} categorias de consumo, o consumo no nó i no instante t é dado por:

$$q_i^t = \sum_{k=1}^{N_{cat}} P_k^t q_{i,k} \tag{13}$$

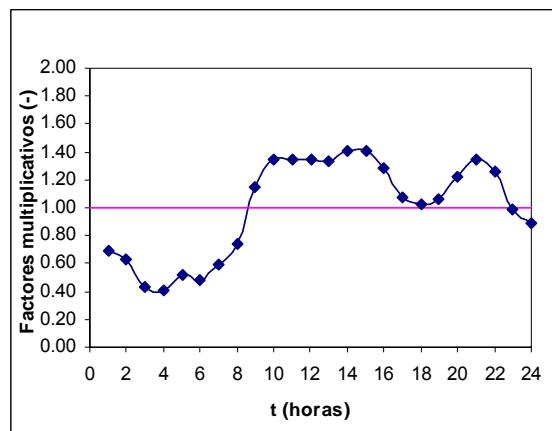
em que P_k^t é o valor, no instante t, do padrão de consumo correspondente à categoria k e $q_{i,k}$ o consumo-base no nó i para a categoria k.

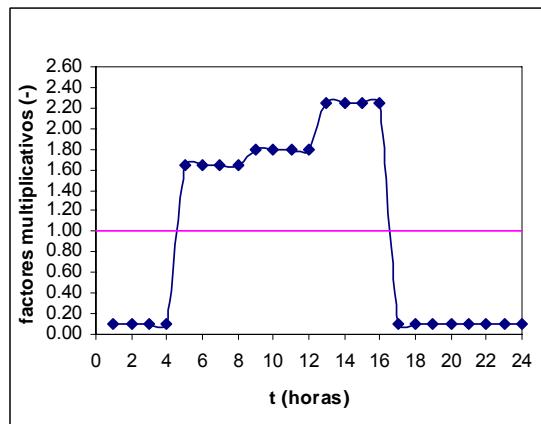
Quando se utilizam padrões de consumo, não é comum utilizar factores multiplicativos de consumo por categoria, podendo utilizar-se um factor multiplicativo global F para todas as categorias, da seguinte forma:

$$q_i^t = F \sum_{k=1}^{N_{cat}} P_k^t q_{i,k} \tag{14}$$

A forma apresentada de especificar os consumos é bastante flexível e permite várias combinações válidas. Como já foi referido, a maioria dos simuladores actualmente disponíveis utiliza este tipo de representação ou variantes equivalentes.

Uma vez que prevê vários graus de liberdade, a flexibilidade deste tipo de representação pode também tornar-se fonte de erros se não for apreendido o significado real dos diferentes componentes. É importante, ao combinar os vários factores envolvidos, manter presente que o principio do balanço de massas tem de ser respeitado.

Em simulação em período alargado, os dois principais factores a manipular são, habitualmente, o consumo base e o padrão de consumo, reservando-se o factor multiplicativo de consumo para correcções, calibração ou análise de sensibilidade do modelo.

Assume-se habitualmente que a distribuição espacial, para o cenário modelado, é fixa – ou seja, estimada uma distribuição espacial de consumos nos nós, esta mantém-se constante (em termos relativos através da rede) ao longo de toda a simulação, sendo as variações no tempo apenas consequência da multiplicação dos consumos nos nós pelo(s) padrão(ões) de variação no tempo.

Esta forma de carregar consumos nos nós e atribuir a variação temporal a um ou mais padrões pode ser aplicada de duas formas, equivalentes entre si do ponto de vista do cálculo hidráulico, e correspondentes às duas formas de especificar o consumo-base descritas anteriormente:

(i) atribuir a cada nó o consumo-base dimensional, e utilizar padrões de consumo *adimensionais,* ou seja, cuja média é a unidade (apenas traduz a variação, sem escala); ou

(ii) atribuir a cada nó um consumo-base adimensional (peso), e utilizar padrões de consumo *dimensionais,* que poderão até ser os próprios registos de caudal entrado na rede.

No primeiro caso, a atribuição de consumos dimensionais aos nós permite uma leitura física directa da magnitude desses valores, sendo os padrões de consumo utilizados para traduzir apenas os comportamentos. A Figura 4.12 mostra os padrões de consumo adimensionais correspondentes aos padrões da Figura 4.11, e que foram obtidos dividindo cada valor pela média do respectivo padrão.

O segundo caso permite utilizar os registos de caudal obtidos por medição à entrada da rede directamente como padrões de consumo, e simular assim com facilidade qualquer cenário real verificado, sem precisar de alterar os consumos-base (partindo do princípio que a sua distribuição espacial se manteria válida para os diferentes padrões introduzidos).

Figura 4.12 – Padrões de consumo adimensionais correspondentes aos padrões da Figura 4.11.

4.4.3.6 Grandes consumidores

Um grande consumidor, do ponto de vista hidráulico, é um local de consumo onde se verifica pelo menos uma das seguintes condições:

(i) o consumo médio é suficientemente grande, por comparação com o caudal que circula na conduta a que está ligado, para a

sua localização ao longo da conduta poder influenciar a perda de carga que nela se verifica; e/ou

(ii) o comportamento ao longo do tempo é suficientemente diferenciado dos que o rodeiam, para em certas horas do dia representar caudais significativamente diferentes e assim causar o mesmo efeito (influenciar a perda de carga ao longo da conduta).

Já foi referido como os consumidores podem ser categorizados por tipo de consumidor, a que poderá corresponder possivelmente um tipo de padrão de consumo específico. Os consumos muito grandes – sobretudo aqueles com medição/registo contínuo individual – ou com comportamentos que não cabem em nenhuma das categorias, devem ser tratados à parte. Levantar-se-á a questão de, dentro de cada categoria, decidir qual o valor do consumo médio que define um grande consumidor. Na realidade, não haverá um valor absoluto. Cada caso tem de ser apreciado em função do potencial que tem para influenciar significativamente o cálculo da perda de carga na conduta a que está ligado.

Se a conduta é sobredimensionada (baixa perda de carga unitária), ou se transporta um caudal muito superior ao consumo em causa, não existirá diferença significativa entre isolar esse consumo num nó intermédio, ou adicioná-lo a um dos nós de extremidade da conduta.

No entanto, se o seu comportamento expectável – traduzido por um padrão de consumo próprio – é diferente dos que o rodeiam fisicamente, então deve ser considerado à parte, sobretudo se o seu caudal médio não é desprezável.

Deve notar-se que a decisão não deve ser tomada apenas com base na análise dos caudais médios mensais. Por exemplo, uma instalação desportiva apenas utilizada aos domingos poderá ter um caudal médio mensal facturado muito menos notável do que o consumo médio horário registado durante um evento. Trata-se, portanto, de um consumo pouco importante para a simulação de cenários de gestão corrente do sistema durante um dia útil, mas que corresponderá a um grande consumidor para a simulação de cenários de fim de semana ou de certos cenários de ponta como a verificação do caudal de combate a incêndio.

4.4.3.7 Sistemas de adução com medição individual de entregas

Os sistemas de adução, também designados por sistemas de transporte e armazenamento – por exemplo, a generalidade dos sistemas multi-municipais em Portugal – com medição individual de todos os pontos de entrega de caudal, são um caso extremo da situação caracterizada nos dois pontos anteriores. Os nós de consumo são os pontos de entrega, e existem em número muito menor do que num sistema de distribuição urbana, permitindo uma análise individual.

Uma vez que é possível caracterizar especificamente cada ponto de entrega, ou seja, cada nó de consumo, podem determinar-se explícita e individualmente os consumos-base e os padrões de consumo. Cada nó de consumo tem assim um padrão de consumo próprio e provavelmente único no sistema (para o cenário simulado). Qualquer das alternativas (i) ou (ii) para especificar o padrão de consumo e o consumo-base, descritas na pág. 109, pode ser adoptada.

4.4.4 Aspectos ligados à representação determinística do consumo

O conhecimento rigoroso do consumo total instantâneo de um sistema de distribuição e do consumo mensal de cada consumidor não é suficiente para caracterizar completamente o cenário de solicitações.

Uma simplificação importante utilizada nos modelos de simulação resulta da consideração de valores determinísticos do consumo nos nós. Dependendo em grande medida do comportamento humano, o consumo de água num sistema de abastecimento tem uma natureza estocástica que se reflecte na sua distribuição espacial e temporal.

A solução encontrada para especificar o consumo numa rede consiste em utilizar valores, distribuídos pelos nós, que representam médias. No sentido de garantir em qualquer momento a lei física da conservação da massa – a soma do que entra no sistema é igual à soma do que sai – a soma das médias parcelares é igual ao consumo médio total, ou ao caudal abastecido médio total.

No entanto, devido à aleatoriedade dos pedidos dos consumidores, não há uma relação biunívoca entre a distribuição espacial dos micro-consumos e o consumo total instantâneo. Por

esta razão, e dado que ainda não é viável medir todos os micro-consumos instantâneos, não é possível garantir que os valores de consumo especificados para o modelo de simulação sejam de facto os reais.

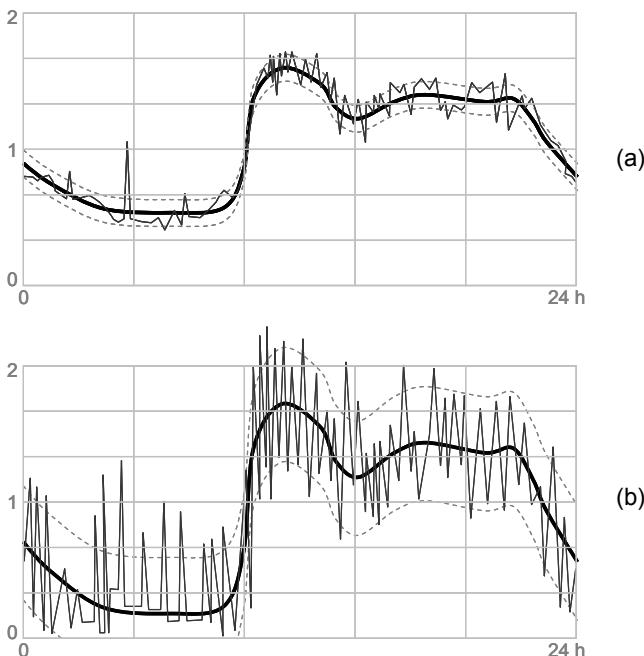



Figura 4.13 – Diagrama adimensional médio de consumo, com bandas de confiança a 90% (tracejado), e representação do consumo real registado num dia específico, para (a) a totalidade de uma rede; (b) um sector de extremidade.

Como se viu anteriormente, a abordagem habitualmente preconizada consiste em estimar uma distribuição espacial média de consumos, adimensionalizada (ou seja, expressa em cada ponto de consumo como uma fracção da unidade), que se admite ser independente do tempo. Esta distribuição é multiplicada pelo consumo total da rede, em cada momento do cenário a simular, para se obter o valor dimensional do consumo em cada ponto.

Enquanto o intervalo de confiança no caso da média total (caudal total abastecido) pode ser relativamente estreito, no caso do consumo em cada nó ele é consideravelmente mais largo. Por outras palavras, é muito menor a probabilidade de o caudal que verdadeiramente ocorre em qualquer momento, num destes troços de menor consumo, se aproximar da respectiva média. Quanto

menor o consumo, menos fiabilidade intrínseca têm os valores de caudal modelados, por representarem médias.

Isto deve-se exclusivamente à natureza dos consumos em si: o consumo agregado de um determinado grupo de consumidores não é mais do que a soma de um número maior ou menor de utilizações individuais, como a abertura de uma torneira, o accionamento de um autoclismo ou o ciclo de uma máquina de lavar. Quanto menor o grupo de consumidores representados por determinado nó de consumo, menos provável é que o respectivo consumo total, num determinado instante, seja representado pela respectiva média no intervalo temporal de referência. A diferença da largura das bandas de confiança da média na Figura 4.13(a) e Figura 4.13(b), para um traçado semelhante da média (o padrão adimensional é teoricamente o mesmo), e a variabilidade dos caudais registados, ilustram esse facto.

Tal facto constitui uma das principais limitações dos métodos de modelação actualmente disponíveis (Alegre, 1992), e uma razão acrescida para o cuidado que é necessário colocar na preparação e especificação dos dados de consumo e de caudal, na construção de modelos.

A hipótese simplificativa exposta não apresenta inconvenientes importantes quando os modelos se destinam a apoiar o projecto de remodelação e/ou o planeamento dos sistemas de distribuição. As situações mais delicadas são as correspondentes à utilização dos modelos para a exploração corrente dos sistemas, sobretudo na fase da sua calibração. Nestes casos, as cotas piezométricas fornecidas como resultados pelo modelo de simulação devem ser comparadas não só com os valores médios correspondentes, medidos *in situ* para um dado cenário de funcionamento, mas também com os valores extremos registados em cada ponto, para o período do dia em causa.

Desta forma, é mais fácil distinguir se as diferenças observadas se devem a deficiências do modelo matemático ou apenas à aleatoriedade dos consumos. Esta dificuldade não deve ser esquecida, dado que impede que, com os métodos actuais, por mais sofisticados que sejam, se possa esperar uma concordância perfeita entre os resultados do modelo e a realidade.

A execução racional e sistemática de análises de sensibilidade auxilia o conhecimento e a interpretação do comportamento do sistema e, em particular, a fundamentação (ou não) dos valores das flutuações de pressões reais e das diferenças entre os valores reais e simulados pelo modelo.

É particularmente importante manter presente esta simplificação no desenvolvimento de modelos para simulação de parâmetros de qualidade da água, uma vez que, como se referiu em 2.3, este tipo de modelos deve procurar considerar todas as condutas da rede. A tolerância a conferir aos resultados obtidos para extremos de rede com consumos agregados muito baixos deve claramente ser alargada, não devendo ser criada a expectativa de que o modelo pode devolver uma grande precisão nessas zonas.

4.4.5 Métodos para distribuição espacial do consumo-base pelos nós

Foi anteriormente referido que, como regra geral, se define uma distribuição espacial média de consumos-base, expressa em cada ponto de consumo como uma fracção da unidade. Essa distribuição é frequentemente adimensionalizada e também independente do tempo, ou seja, é válida para todo o período a simular, apesar de o caudal total consumido poder variar ao longo desse mesmo período.

Nesta secção, são apresentados diversos métodos para obter essa distribuição espacial. A selecção do método mais adequado deve ter em consideração, fundamentalmente, os aspectos seguintes:

- tipo e qualidade da informação disponível;
- equipamento de medição e de processamento disponíveis;
- objectivos de aplicação do modelo.

Os modelos a construir para simulação dos sistemas de abastecimento e distribuição podem destinar-se tanto a objectivos de operação, manutenção e reabilitação como ao apoio ao planeamento e licenciamento. Assim, interessa:

- reproduzir tão correctamente quando possível a situação actual de consumos;
- escolher uma estratégia de carregamento e criar mecanismos tais que facilitem a contínua actualização da representação dos consumos; e
- sendo inevitavelmente uma tarefa fastidiosa – pelo menos da primeira vez que é executada – procurar a forma de a executar que seja temporalmente menos onerosa, mais automatizável e menos sujeita a erro humano.

A classificação dos métodos que seguidamente se adopta é de índole didáctica, não sendo eles de aplicação mutuamente exclusiva. É frequente usar-se, perante casos concretos, soluções que são combinações de vários métodos, de modo a tirar o máximo partido dos recursos técnicos e humanos envolvidos.

Os métodos habitualmente empregues em modelação de sistemas de abastecimento envolvem essencialmente 3 tipos de estratégias:

- os métodos que estimam os consumos nos nós a partir da análise da informação cartográfica;
- os métodos que recorrem à construção de tabelas de correspondência entre os valores registados no sistema de facturação e os nós do modelo; e
- os métodos que realizam uma ligação funcional entre o sistema de facturação, o sistema de informação geográfica e o modelo, por forma a contabilizarem os consumos associados aos nós do modelo.

Os pontos seguintes explicitam as principais características dos três tipos de métodos.

4.4.5.1 Métodos baseados na análise cartográfica

Os métodos baseados na análise da informação cartográfica são métodos aproximados, que fornecem essencialmente estimativas, mas que possuem uma relativa flexibilidade. São a primeira escolha nos casos em que a informação é escassa ou quando não é possível ou aconselhável utilizar os valores de facturação. Incluem-se na primeira situação os casos de planeamento, dimensionamento ou expansão de sistemas.

Destacam-se, no texto abaixo, as duas variantes principais destes métodos: estimativas que definem áreas de influência dos nós, e estimativas calculadas a partir de coeficientes de utilização das condutas.

4.4.5.1.1 Método das áreas de influência

0 método das áreas de influência baseia-se na delimitação em planta da área de influência de cada nó do modelo, na contabilização do número de consumidores existentes em cada área, e no cálculo dos consumos médios por consumidor, classificados em "ligações sem contador", "ligações com contador" e "grandes consumidores". Este método foi introduzido em larga

escala, por exemplo, no Reino Unido (onde foi preconizado pelo Water Research Centre), onde a maioria dos consumidores domésticos não possui contador individual.

Elaborado com o objectivo de tornar a preparação de dados relativamente simples e rápida, este modelo pressupõe a hipótese simplificativa de se considerar que existe homogeneidade de comportamentos entre consumidores.

No LNEC (Alegre, 1986), desenvolveu-se uma variante que entra em conta com os limites das áreas de leitura, com o tipo de consumidor e com o tipo de ocupação urbanística. A razão de considerar as áreas de leitura deve-se ao facto de ser frequente dispor-se dos valores dos consumos totais medidos mensalmente em cada uma, por tipo de consumidor. Trata-se assim de informação já disponível relativa a unidades geográficas de dimensão relativamente pequena, que constituem um meio termo entre a consideração de valores totais e de valores individuais.

A técnica apresentada pelo Water Research Centre é resumidamente a seguinte:

(i) Reúne-se a cartografia que contenha a informação sobre a localização, o diâmetro e as interligações de todas as condutas do sistema de distribuição a modelar.

(ii) Marca-se sobre essa cartografia as condutas que se pretenda considerar no modelo, marcando nomeadamente os nós de modelação pretendidos.

(iii) Desenha-se sobre a mesma cartografia as áreas de influencia de todos os nós. A área de influência de um nó deverá conter todos os locais de consumo abastecidos a partir de condutas ligadas ao nó, contabilizando-se em cada conduta apenas a metade contígua ao nó em causa (a outra metade é atribuída ao nó da outra extremidade).

(iv) Contabiliza-se, para cada área de influência, o número de ligações sem contador e o número de ligações com contador e identificam-se os grandes consumidores com os nós de que dependem. A este nível, pode ser feita a contabilização por tipo de consumidor (doméstico, industrial, comercial, etc.), mantendo a individualização de tratamento para os grandes consumidores. Por grandes consumidores, devem entender-se todos os que tiverem consumos médios muito altos, ou altas taxas de consumo durante curtos períodos, ou ainda consumos nocturnos significativos.

(v) Através de um factor de escala, convertem-se os valores assim obtidos nos consumos que, no total, perfaçam o caudal fornecido à rede para cada cenário de funcionamento.

Para a variante desenvolvida no LNEC, a técnica aconselhada é a seguinte:

(i) Traça-se sobre o esquema do sistema de distribuição a delimitação das áreas de influência e das áreas de leitura.

(ii) Associam-se os consumidores em grupos a que corresponda o mesmo tipo de diagrama de consumo (por exemplo, doméstico, comercial, industrial, serviços, etc..).

(iii) Determina-se o peso, por grupo, que cada área de influência representa dentro de cada área de leitura. Os pesos a dar a cada área (ou parcela de área) de influência podem ser calculados seja com base numa análise qualitativa da ocupação urbanística, seja com base no número de ramais, no número de contratos ou no número de habitantes. Na hipótese da utilização do número de ramais, é igualmente necessário ter em consideração as heterogeneidades de ocupação urbanística. Os grandes consumidores deverão ser tratados individualmente.

(iv) Admitem-se diagramas de consumo diário adimensionais típicos de cada grupo de consumidores considerado em (ii) (dados pela relação, em cada instante, entre os caudais correspondentes aos consumos instantâneos e aos médios mensais).

(v) Para cada cenário a simular, toma-se o consumo medido por área de leitura e por grupo de consumidor, afectado das perdas e do factor de carga correspondente à simulação em causa. A este valor subtrai-se o consumo total dos grandes consumidores afectados dos factores de carga adequados.

(vi) Calcula-se, para cada nó, o consumo correspondente através dos seus pesos, de forma ao total perfazer o valor calculado em (v). No final, soma-se o consumo instantâneo de cada grande consumidor no nó em que se localize.

O método das áreas de influência é de utilização bastante simples, não sendo exigente em termos de qualidade e de quantidade de dados de base. No entanto, nos casos em que os elementos cadastrais são deficientes, ou em que é necessário fazer simulações com configurações de geometria diversificadas, a preparação dos dados para alterar os cenários de funcionamento

é trabalhosa; a introdução ou a extinção de um novo nó exige actualizações nas áreas de influência de todos os nós adjacentes.

Este método é aplicável em modelos de simulação para apoio à exploração, ao projecto e ao planeamento. É simples fazer análises de sensibilidade ao consumo total do sistema. Permite igualmente testar factores multiplicativos diferentes para cada tipo de consumidor. Se se dispuser de dados sobre os diagramas típicos de variação dos consumos horários ou instantâneos ao longo do tempo por tipo de consumidor, a facilidade referida é importante. Estes factores multiplicativos podem ser gerais para toda a rede ou especificados por zona de leitura.

Se nos abstrairmos do significado físico do peso dado a cada área de influência por tipo de consumidor (número de ligações existentes), é ainda possível estudar a sensibilidade do sistema de distribuição a flutuações de consumo localizadas, alterando pontualmente os pesos na zona em causa.

Sendo um método aproximado, dele pode esperar-se ordens de grandeza e não resultados exactos. Além das simplificações introduzidas na fase de elaboração do modelo, não é de esperar que os pesos atribuídos aos nós sejam actualizados sempre que surja um novo consumidor. A actualização dos dados deve ser garantida, mas com uma frequência relativamente pequena. Para sistemas semi-estabilizados, actualizações bi-anuais ou até anuais são suficientes.

Finalmente, refira-se que só faz sentido utilizar a versão desenvolvida no LNEC se as áreas de leitura acompanharem em linhas gerais as manchas de ocupação urbanística diferenciada, e se, dentro de cada área de leitura, as leituras de consumo forem todas feitas em curtos espaços de tempo e com ciclos de igual dimensão para todos os consumidores.

4.4.5.1.2 Método dos coeficientes de utilização das condutas

0 método dos coeficientes de utilização das condutas baseia-se na constatação de que, enquanto uma área de influência de um nó (tal como definida acima) não tem, em regra, qualquer significado do ponto de vista urbanístico, os arruamentos ao longo dos quais se desenvolvem as condutas correspondem geralmente a tipos de ocupação relativamente mais homogéneos.

Mesmo que a escassez de dados seja grande, é relativamente fácil a quem conhece bem o aglomerado urbano em causa estimar

os pesos relativos dos vários troços de conduta, em função da densidade urbanística.

O método pressupõe que a distribuição de consumo é homogénea dentro de cada troço, sendo os pesos atribuídos por unidade de comprimento de conduta. Esta hipótese traz como consequência que o aparecimento ou o desaparecimento de nós numa dada conduta não acarreta a introdução de qualquer alteração nos dados de consumo.

A técnica a utilizar é a seguinte:

(i) Reúne-se a cartografia que contenha a informação sobre a localização, o diâmetro e as interligações de todas as condutas do sistema de distribuição a modelar, e sobrepõe-se aos ortofotomapas correspondentes (caso estejam disponíveis) ou à cartografia que contenha a informação sobre a ocupação do solo.

(ii) Marca-se sobre essa cartografia as condutas que se pretenda considerar no modelo, marcando nomeadamente os nós de modelação pretendidos.

(iii) Selecciona-se o tipo de ocupação predominante no aglomerado em estudo (por exemplo: “edifícios de apartamentos com cinco pisos, em banda, dos dois lados da rua”).

(iv) Atribui-se coeficientes de utilização unitários aos troços de conduta que abastecem zonas deste tipo.

(v) Calculam-se coeficientes de utilização para todos os troços, por comparação com os primeiros (superiores à unidade se a ocupação for mais densa; inferiores, caso contrário), excluindo os grandes consumidores.

(vi) Em alternativa a (iii) a (v), e se houver dados em quantidade e qualidade que o justifique, pode contabilizar-se o número de fogos ligados a cada troço e dividir esse valor pelo comprimento do troço. Os coeficientes obtidos por esta segunda via são naturalmente mais correctos. O número de habitantes servidos ou o número de ramais associado ao tipo de ocupação urbanística poderão eventualmente constituir também alternativas válidas.

(vii) Cria-se uma tabela com os números dos nós onde se localizam grandes consumidores e os consumos respectivos.

(viii) Ao caudal médio total fornecido à rede subtrai-se o consumo médio total dos grandes consumidores, e divide-se o valor obtido pelo comprimento total da rede, ponderado com os coeficientes de utilização.

(ix) Soma-se, para os vários troços confluentes a cada nó, o produto do semi-comprimento de cada troço pelo peso respectivo e pelo factor calculado em (viii). Nos nós onde há grandes consumidores, soma-se o consumo respectivo. Este pré-processamento pode ser efectuado, por exemplo, por uma folha de cálculo relativamente simples.

0 método dos coeficientes de utilização é, de todos os métodos referidos, o de aplicação mais simples. Apresenta a grande vantagem de permitir obter resultados de confiança razoável mesmo para situações de grande escassez de dados, uma vez que o estabelecimento empírico dos coeficientes é muito mais intuitivo para este método do que para o das áreas de influência. Na hipótese de haver dados cadastrais e de consumo fidedignos, os coeficientes poderão ser determinados com maior rigor, tirando partido da informação disponível.

O facto de se definir um coeficiente como o peso que a unidade de comprimento de conduta tem na rede facilita significativamente a alteração dos cenários de funcionamento, ou as alterações da geometria da rede devidas a correcções cadastrais, a manobras de válvulas ou a obras na rede. Isto porque a introdução de um novo nó ou a introdução, eliminação ou alteração do peso de um dado troço exigem apenas que se modifiquem em conformidade os dados desse nó ou troço.

4.4.5.2 Métodos baseados nos dados de facturação

Os objectivos primordiais das estratégias de distribuição espacial dos consumos baseadas nos dados de facturação são:

- procurar aproveitar a informação contida nos registos de leitura dos consumidores; e
- explorar as possibilidades efectivas de automatização, no sentido de aligeirar e tornar eficazes os mecanismos de actualização da estimativa.

Os métodos descritos nesta secção do texto recorrem essencialmente à construção de tabelas de correspondência entre os valores registados no sistema de facturação e os nós do modelo.

O processo-chave passa, assim, pela identificação de um campo da base de dados de consumos que possa ser utilizado como chave para obter o consumo de cada local de consumo, e que possa ser associado a um nó do modelo.

No caso dos sistemas de facturação e gestão de clientes mais comuns nas entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água em Portugal, é possível identificar três soluções para o carregamento de consumos a partir dos registos de facturação, passando pela utilização da área de leitura, do número de polícia ou do código de ramal.

Estas três soluções são detalhadas abaixo, sendo possível conceber variações consoante as características e os campos implementados no sistema de clientes em causa. A descrição que se segue deverá ser tomada a título ilustrativo. Deverá ter-se em atenção o referido em 4.4.2.

4.4.5.2.1 Área de leitura

Uma das unidades espaciais para as quais é mais simples obter totais de consumo, a partir da base de dados de consumos, é a área de leitura. É comum uma área de leitura englobar cerca de 100 a 250 locais de consumo.

Esta solução implicaria a criação de uma tabela de correspondência que relacionasse cada nó do modelo com a(s) área(s) de leitura que coincidisse(m) com ou intersectasse(m) a sua área de influência, bem como as respectivas percentagens de coincidência. As áreas de influência dos nós poderiam ser definidas de acordo com os métodos clássicos anteriormente referidos.

O

Quadro 4.14 exemplifica para dois nós, em que a área de influência do primeiro (N12340) é intersectada por 2 áreas de leitura (A0013 e A0021), e a área de influência do segundo (N12350) coincide exactamente com a área de leitura A0047.

O total de consumo em cada área de leitura (i.e., a passagem da 4ª coluna para a 5ª coluna do

Quadro 4.14) é habitualmente um dos dados que as aplicações de gestão de clientes permitem obter com facilidade.

Quadro 4.14 - Tabela de correspondência entre nós de modelo e áreas de leitura.

Nó	Área de leitura	Consumo total da área de leitura	Contribuição para o nó		Total acumulado no nó
			%	Consumo	
N12340	A0013	23445.00	12	2813.40	2813.40
	A0021	534.00	45	240.30	3053.70
N12350	A0047	44.06	100	44.06	44.06

Uma estimativa grosseira da ordem de grandeza do número de nós expectável em modelos de redes de distribuição urbana (incluindo todas as condutas), e considerando a dimensão típica das áreas de leitura, apontaria para um número médio de 5 a 15 nós por área de leitura. Tal obrigaria a um esforço considerável para: definição completa das áreas de influência dos nós; subdivisão das áreas de leitura, por sobreposição com as áreas de influência; e estimativas planimétricas para atribuir a percentagem com que cada área de leitura contribuiria para cada nó.

Uma dificuldade frequente é a inexistência de uma marcação dos limites das áreas de leitura na cartografia disponível na entidade gestora. Por outro lado, existe flexibilidade para a introdução de ajustes ao traçado das áreas de leitura, por forma a garantir pontualmente uma maior coincidência entre estas e as áreas de influência dos nós.

Em termos de actualização futura, as flutuações de consumo, a introdução de novos consumidores ou locais de consumo, ou o encerramento de contratos em cada área de leitura seriam automaticamente tratados, pois seriam contabilizados nos totais de consumo. Mais problemáticos seriam os casos de eliminação de um nó ou de introdução de um novo nó no modelo, pois as áreas de influência teriam de ser redesenhadas, as áreas de leitura novamente subdivididas (para os nós em causa e os respectivos nós limítrofes) e as percentagens recalculadas.

4.4.5.2.2 Número de polícia

O número de polícia (incluindo o duplicador) é o número que identifica a porta principal de uma casa, de um edifício ou de um bloco de apartamentos e tem uma correspondência física com o ramal domiciliário, na maioria das situações. A utilização deste

registo implica a criação de uma tabela de correspondência entre cada nó e os números de polícia e códigos de rua que representam o consumo associado a esse nó. O Quadro 4.15 exemplifica para um nó hipotético, a que estariam associados troços de 2 arruamentos diferentes.

Quadro 4.15 - Tabela de correspondência entre nós de modelo e gamas de n.^{os} de polícia.

Nó	N.^{os} de Polícia	Nome da rua	Código de Rua	D	C	F	L	CGH	Consumo	Consumo acumulado no nó
N12340	1	Rua Júlio Diniz	000149					DCFLRND	1.40	1.40
	2							DCFLRND	2.34	3.74
	⋮							⋮	⋮	⋮
	13A							DCFLRND	0.45	11.23
N12340	352	Rua das Malvas	000078					DCFLRND	3.10	3.10
	354							DCFLRND	0.08	3.18
	⋮							⋮	⋮	⋮
	388							DCFLRND	1.02	14.55

A tabela é gerada por pesquisa directa na cartografia, e pelo preenchimento das colunas “Números de polícia” e “Código de rua”, sem necessidade de cálculos ou estimativas (desde que o n.º de polícia já esteja presente na cartografia). Esta identificação do local de consumo terá de ser complementada, através de colunas adicionais, para os elementos que compõem a chave geográfica horizontal, ou CGH (ver 4.4.2). As colunas adicionais correspondem ao Distrito, Concelho, Freguesia e Lugar. O seu preenchimento é simplificado por serem constantes ou quase para cada sector de distribuição.

A geração da coluna CGH é automatizável a partir dos elementos que estão à sua esquerda na tabela. Dessa coluna, uma *query* à base de dados permitirá obter os consumos agregados de todos os locais de consumo com a mesma CGH.

É comum as aplicações de clientes não permitirem efectuar directamente esta *query*, sendo necessário requisitar especificamente a sua execução uma a uma. Para além dos custos, tal não é prático dado o volume de dados a obter e a dificuldade em automatizar esse tipo de *queries* com a actual aplicação.

Uma via para a obtenção automatizada dos consumos agregados de todos os locais de consumo com a mesma CGH é a utilização da tabela global de consumos obtida a partir da base de dados de clientes, com a periodicidade requerida pela necessidade de actualizar os consumos no modelo (p.ex. anualmente). Se for utilizado um formato de base de dados comum, será relativamente simples produzir um mecanismo de *queries* para o fim desejado. Esta via é claramente aconselhável se se pretender utilizar a solução dos números de polícia, uma vez que permite actualizações automatizadas, após a obtenção da primeira solução, e normalmente sem encargos financeiros adicionais.

Refira-se que o problema da eliminação ou introdução de um nó seriam mais simples de resolver nesta solução do que na anterior (áreas de leitura), pois apenas envolve a alteração da(s) lista(s) de números de polícia associada(s) ao(s) nó(s) envolvido(s) e limítrofes, sem necessitar de cálculos ou estimativas de qualquer natureza por parte do utilizador. As flutuações de consumo são automaticamente tratadas nas actualizações, bem como a criação ou eliminação de contratos ou locais de consumo. Haverá apenas necessidade de actualizar a tabela com os novos números de polícia que forem sendo criados.

De notar que o código relativo ao número de polícia é também utilizado para referenciar locais sem número de polícia, pelo que estes locais podem também ser abrangidos por esta solução de carregamento.

4.4.5.2.3 Código de ramal

Esta solução passa pela utilização de um código de ramal, seja a partir de um código pré-existente na EG e no sistema de clientes, seja criando um especificamente para o efeito. Existem por norma campos livres na base de dados de clientes para o carregamento de códigos adicionais. É comum existirem campos livres no registo do local de consumo, que poderão ser utilizados para este fim.

O código de ramal apresenta uma correspondência ideal com a noção de consumo pontual (tal como no caso do n.º. de polícia), que se pretende modelar. Tem ainda o benefício de permitir um desejável registo dos ramais existentes, com vantagens cadastrais e de manutenção da rede.

Caso o código de ramal não exista, esta solução implica o carregamento total do código adicional, ou seja, a criação dos códigos e o preenchimento desse campo para todos os locais de consumo.

Já existindo o código de ramal, ou tendo sido introduzido para o efeito, será necessário criar uma tabela em que a cada nó é associado o conjunto de entradas do código de ramal, que será utilizado directamente para interrogar a base de dados e obter os totais de consumo por nó. O Quadro 4.16 apresenta um exemplo hipotético.

Quadro 4.16 - Tabela de correspondência entre nós de modelo e o código de ramal.

Nó	Código de ramal	Consumo	Consumo acumulado no nó
N12340	Xpt0	1.40	1.40
	Xpt1	2.34	3.74
	⋮	⋮	⋮
	XptN	0.45	11.23
N12340	Xpt0	3.10	3.10
	Xpt1	0.08	3.18
	⋮	⋮	⋮
	XptN	1.02	14.55

A solução do código de ramal poderá ser semelhante à do número de polícia, em termos de volume de trabalho, dependendo do formato de código que for criado. Tem, no entanto, a vantagem apreciável de ser um trabalho com múltiplos benefícios, pois o cadastro de ramais é actualmente uma peça bastante desejável da panóplia de ferramentas ao dispor da entidade gestora.

Uma solução que evita a duplicação de esforços é um formato de código de ramal baseado na CGH. Para a pesquisa da base de dados e obtenção dos valores do consumo, poderá ser utilizado um mecanismo semelhante ao aconselhado no caso dos números de polícia (através da tabela global de consumos).

4.4.5.2.4 Outros aspectos a considerar

É importante notar que os consumos associados aos nós, por intermédio de qualquer das três soluções acima descritas, são consumos totais, com a respectiva dimensão (p.ex., o nó N12340 teria um consumo total associado de 11.23 m^3/h). Tal como se

referiu em 4.4.3, esta é uma das formas de carregamento dos consumos nos nós do modelo. A outra forma consiste na divisão destes valores do consumo pelo total para toda a rede, por forma a carregar cada nó com um peso relativo (sendo a soma de todos estes pesos a unidade).

No primeiro caso, o modelo é carregado com padrões de variação diária adimensionais, no segundo caso com padrões dimensionais ou com registos reais de caudal.

4.4.5.2.5 Discussão das alternativas

Das hipóteses acima descritas, aquela que envolve o menor esforço de introdução de informação nova e oferece um mecanismo sólido de actualização (a manterem-se as premissas de disponibilidade de dados de consumo em que se baseia) é a que utiliza o número de polícia.

A solução que utiliza o código de ramal poderá envolver um volume de trabalho equivalente na construção da tabela de nós, no caso da utilização de um formato de código criteriosamente construído, e possui uma eficácia semelhante na interrogação da base de dados. Caso o código não exista já na entidade gestora, envolve sempre o trabalho adicional considerável da introdução do novo código em todos os registos na base de dados. Para além disso, trata-se de um código cuja utilização transcende o modelo de simulação, e que envolverá algum trabalho administrativo e organizativo, no seio da EG, no sentido de criar os mecanismos para a sua geração e transmissão aos serviços interessados. No entanto, pelos largos benefícios adicionais na utilização deste código, será provavelmente a solução globalmente mais aconselhável.

As soluções envolvendo o número de polícia ou o código de ramal poderão ter algumas vantagens no tratamento dos grandes consumidores, uma vez que os consumos individuais são carregados para a tabela de nós e poderá ser implementada uma rotina de identificação e individualização automática de consumos acima de determinado limite.

Poderá haver grandes consumidores cuja dimensão justifique um tratamento específico, fora dos procedimentos acima descritos. Deverá, nesses casos, procurar-se obter registos contínuos do caudal consumido, seja através da montagem de *dataloggers* nos contadores (caso seja possível), seja pela realização de campanhas temporárias de monitorização, utilizando medidores portáteis. Estes casos são tratados da mesma forma que o caudal

entrado num sector de distribuição, no sentido de produzir padrões de consumo e valores médios de caudal que são individualmente carregados no modelo.

4.4.5.3 Métodos baseados na interligação SIG – sistema de facturação – modelo

Quando a codificação de ramais está completamente implementada tanto no sistema de facturação como no SIG, com os ramais representados e georeferenciados neste último, estão criadas as condições para que este último possa ser alimentado com, compilar e armazenar totais de consumo, por ramal, para intervalos de tempo pré-definidos. Não sendo de forma alguma um processo de realização banal, antes implicando um investimento em tecnologia e uma implementação cuidadosa, é sem dúvida uma solução que abre um leque de aplicações muito interessantes.

Uma dessas aplicações é justamente a possibilidade de fornecer a um modelo de simulação, para além da infra-estrutura física, os valores de consumos acumulados em nós de modelação.

Tal pressupõe a existência, não só da referida possibilidade de exportação para o modelo, mas igualmente da capacidade de o SIG agregar os ramais e os respectivos totais de consumo às condutas a que estão ligados, e seguidamente concentrá-los nos nós de modelação, tarefa que, sendo conceptualmente possível, não é trivial.

No caso de ser possível, é claramente a melhor solução para o carregamento da distribuição espacial de consumos num modelo, pois pode atingir um grau de automatização muito apreciável, e simplificar assim a geração da solução inicial, e sobretudo a sua actualização futura.

Sublinha-se que esta é uma capacidade que depende do SIG e respectivo *software* de implementação, por um lado, e da existência de um código de ramal correctamente implementado tanto no sistema de facturação como no SIG, com os ramais representados e georeferenciados neste último, por outro.

4.4.6 Análise de dados de caudal – como estimar e representar o comportamento dos caudais medidos na rede

A análise de caudais tem como objectivo principal a produção de séries temporais de caudais médios diários, para estudo das

principais tendências sazonais, e de caudais médios em base temporal mais curta (horária ou inferior) para produção e tipificação de padrões de consumo diário.

A forma de utilização destes elementos no modelo foi já referida em 4.4.2. Para além dessa utilização directa, a análise de caudais e padrões de consumo apoia a construção dos modelos na tipificação de cenários e na definição de condições operacionais (4.5).

Como se viu em 4.4.3, no caso dos sistemas de adução ou transporte, os consumos a satisfazer são os caudais contratados nos pontos de entrega ou os caudais de entrada nos reservatórios de distribuição. Os nós de consumo são em muito menor número – tipicamente não mais do que algumas dezenas – e o problema da estimativa e distribuição de consumos pelos nós é conceptualmente menos complexo do que no caso das redes de distribuição. É frequente existir medição de caudal nos pontos de entrega, o que significa que cada nó de consumo pode ser individualmente caracterizado, em vez de se recorrer às técnicas apresentadas anteriormente para atribuição de parcelas do caudal total entrado na rede aos nós de consumo. Não deve todavia ser desprezado o volume de trabalho necessário para o correcto processamento de dados contínuos de caudal e de nível.

A metodologia apresentada seguidamente aplica-se directamente à caracterização de caudais individualmente medidos e registados, sejam caudais entrados nos pontos de alimentação do sistema, sejam caudais saídos nos pontos de entrega.

4.4.6.1 Tratamento de séries temporais de caudal

Os consumos globais de cada sector da rede, para um determinado cenário de funcionamento, são determinados através do processamento dos registos contínuos de caudal que deverão estar disponíveis, seja através do sistema de telegestão, seja localmente, em contínuo ou como resultado de campanhas de monitorização temporárias. É frequente ser necessário recorrer também às variações de nível nos reservatórios, em instalações onde não haja medição de caudal de saída, para calcular este último por diferenciação com o caudal de entrada, obtido a partir de medidores ou outras estimativas a montante.

O objectivo do processamento é, como se mencionou acima, a produção de séries normalizadas de caudais médios diários, bem como de caudais médios em base temporal mais curta, a partir dos registos contínuos de caudal. Por base temporal mais curta

entende-se uma base temporal de detalhe, suficiente para as aplicações de modelação – é comum utilizar-se um passo temporal da ordem dos 5, 10 ou 15 minutos, embora em certos casos se use com eficácia adequada o intervalo horário, por não ser possível obter informação de maior detalhe a partir dos registos originais.

A partir das séries temporais originais, é assim necessário reduzi-las às duas bases temporais (diária e curta) referidas, com os devidos cuidados na interpolação de valores, e processar de forma eficaz os brancos e os registos inutilizáveis (incoerentes ou fora da gama válida do medidor). Estes devem ser contabilizados para se conhecer o grau de significância das séries. Coelho (1990) descreve a forma de redução dos registos à base temporal pretendida.

Das séries de caudais médios instantâneos são posteriormente produzidos os padrões diários de consumo, tal como se descreve no ponto seguinte.

O tratamento dos dados de caudais e de níveis envolve geralmente um volume de trabalho considerável, devido à elevada quantidade de informação a tratar e ao facto dos registos poderem estarem organizados de uma forma não directamente utilizável para o fim pretendido. Para que seja possível estimar os consumos globais na rede, para um determinado cenário de funcionamento, é necessário dispor-se de um conjunto de registos temporais de caudais e níveis representativos do funcionamento da rede e de informação sobre todos os volumes fornecidos à rede.

A produção de padrões diários de consumo necessita de séries de registos com a duração mínima de 10 a 15 dias do tipo daquele que se pretende tipificar. Ou seja, para produzir um padrão diário de consumo em dia útil, poderá bastar um registo de 2 a 3 semanas, ou seja, 10 a 15 ocorrências de um dia útil; para produzir um padrão típico de um domingo, com a significância desejável, serão necessárias 10 semanas de registo (10 domingos). As estimativas pressupõem que a série de caudais médios diários apresenta alguma estabilidade, ou seja, que não é (muito) afectada por tendências sazonais.

Nos pontos de abastecimento ou de entrega em que não seja possível efectuar o estudo estatístico de caudais, e produzir valores médios e perfis adimensionais, devem utilizar-se estimativas baseadas nos valores das regulações de caudal operacionais predominantes para a época em causa.

4.4.6.2 Determinação de padrões de consumo

À semelhança do que se faz correntemente, por exemplo, na gestão operacional de redes de energia eléctrica, o cálculo de diagramas de carga, ou padrões de variação do consumo ao longo do dia baseia-se na análise estatística dos registos contínuos de caudal. O conceito básico resume-se a uma curva que une pontos representativos do valor médio do consumo em sucessivos momentos ao longo do dia. Tais médias são calculadas sobre um trecho do registo que se considere representativo para o fim em vista, salientando-se que as variações sazonais, por exemplo, podem influenciar grandemente o andamento da curva.

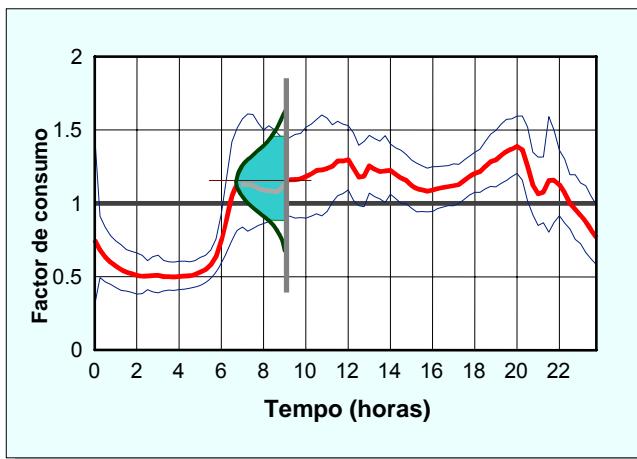



Figura 4.14 – Padrão adimensional de consumo com amostra transversal de consumos sobreposta num instante particular, com uma distribuição log-normal adaptada.

A metodologia utilizada no seu cálculo (Coelho, 1990) consiste em adimensionalizar os valores do caudal ao longo da amostra em estudo, dividindo-os pelo caudal médio do dia a que se referem. Dado que os efeitos sazonais se fazem sentir mais sobre a escala da curva do que propriamente sobre o seu andamento, o diagrama adimensional assim obtido tem a vantagem de ver eliminados grande parte desses efeitos. Naturalmente que, se o efeito sazonal for muito pronunciado, se deverá aplicar este método a trechos de registo relativamente homogéneos desse ponto de vista, devendo-se, como é o caso, dividir o ano nas principais épocas.

Sobre a amostra adimensional assim obtida para cada ponto da curva (ver Figura 4.14), o valor médio e o respectivo intervalo de

confiança são calculados adaptando um modelo probabilístico baseado na distribuição log-normal[20].

A determinação de padrões diários adimensionais de consumo permite separar o comportamento temporal dos consumos da escala de caudais a que ocorrem. O facto de os padrões serem adimensionalizados permite a comparação directa dos dias da semana entre si para a mesma época, e entre épocas do ano diferentes ou de ano para ano. A quantidade de informação contida nos diagramas é bastante grande e, por se tratar de um suporte gráfico, muito facilmente perceptível. Tipicamente, as maiores diferenças serão encontradas entre os dias úteis, os sábados e os domingos.

A modelação dos sistemas beneficia grandemente da utilização de padrões diários adimensionais, tal como se mencionou anteriormente, uma vez que permite carregar o modelo com os *comportamentos* típicos e trabalhar o factor de escala independentemente, mesmo que com base nos consumos médios diários calculados conjuntamente com os padrões.

Note-se ainda que os padrões de consumo acima descritos poderão também ser calculados, e utilizados no modelo, na sua forma dimensional, ou seja, sem adimensionalizar previamente a amostra. Os perfis dimensionais possuem uma escala real, e podem ser utilizados no modelo por multiplicação com consumos nodais do tipo fracção (ver 4.4.3).

4.4.6.3 Cenários a modelar

Os sistemas de distribuição de água enfrentam uma variabilidade de condições de operação que são essencialmente consequência da natureza estocástica dos consumos (as solicitações), das disponibilidades de água na produção, das capacidades de armazenamento nos locais estratégicos da rede e de condicionalismos de funcionamento da própria rede.

Apesar de toda esta variabilidade, verifica-se que é habitualmente possível isolar um número de cenários de operação que reflectem efeitos de sazonalidade, à escala de meses, e variações ligadas

---

[20] Coelho (1990) concluiu que a distribuição log-normal proporcionou a melhor adaptação às amostras “transversais” de caudal adimensionalizado, na maioria dos casos que analisou.

às diferenças entre dias úteis e dias de descanso, à escala semanal e diária.

A análise de caudais diários e instantâneos, por um lado, e a experiência operacional dos operadores, por outro, permitem caracterizar de forma suficientemente individualizada os principais efeitos sazonais durante o ano – como sejam as diferenças Verão/ Inverno, ou eventuais comportamentos típicos de certas épocas festivas e férias escolares (por exemplo, Natal, Carnaval e Páscoa). Permitem ainda caracterizar os comportamentos mais típicos entre os diagramas diários de consumo, sendo comum a individualização dos dias úteis, sábados e domingos ou feriados.

Esta identificação de cenários a modelar, que deve ser realizada ao longo do estudo de caudais e padrões de consumo acima descrito, é fundamental para o desenvolvimento organizado do modelo, de forma a satisfazer as utilizações pretendidas de maneira eficaz, e deve envolver activamente, entre outros, os operadores do sistema de telegestão.

4.5 Dados do controlo operacional

4.5.1 Introdução

O controlo operacional da rede é exercido através do conjunto de accionamentos automáticos ou manuais de válvulas e estações elevatórias ou sobrepressoras, por forma a ajustar a configuração do sistema às necessidades operacionais de cada instante.

Os controlos são um conjunto de instruções efectuadas em grande parte de forma automática no sistema, através do sistema de telegestão ou de automatismos locais ou remotos, ou ainda de procedimentos manuais repetitivos ou sistemáticos por parte dos operadores, e traduzem o modo como a rede é operada diariamente em função de determinadas condições.

Estes controlos podem incidir sobre o estado das condutas, bombas ou válvulas, e são normalmente accionados em função do instante do tempo (i.e., instante do dia, dia da semana, época do ano), da altura de água num reservatório e da variação de caudal ou pressão em determinados pontos da rede.

Há controlos que traduzem apenas um reflexo de accionamento de um automatismo – por exemplo, o funcionamento de uma válvula de flutuador na entrada de um reservatório é especificado

como uma condição simples – e como tal encontram-se associadas à descrição da infra-estrutura física e não das regras de operação.

Nos simuladores modernos, existem habitualmente duas categorias de controlos:

- controlos simples
- controlos com condições múltiplas

Descrevem-se seguidamente os dois tipos de controlos e sua aplicação, utilizando para efeitos ilustrativos a linguagem de construção de controlos do simulador Epanet 2.0 (Rossman, 2002).

4.5.2 Controlos simples

Os controlos simples alteram o estado ou as propriedades de um troço com base na altura de água num reservatório de nível variável, na pressão num nó, no instante de simulação e no instante do dia. No controlo simples que se exemplifica seguidamente, o troço 12 fecha se a pressão no nó 23 estiver acima de 35 m

```
LINK 12 CLOSED IF NODE 23 ABOVE 35
```

4.5.3 Controlos com condições múltiplas

Os controlos com condições múltiplas permitem que o estado e as propriedades dos troços dependam da combinação de um conjunto de condições que podem ocorrer na rede, após o cálculo das condições hidráulicas iniciais.

O controlo de condições múltiplas abaixo ilustrado permite desligar uma bomba e abrir a conduta de by-pass, quando a altura de água no reservatório de nível variável excede um determinado valor, e efectuar a operação inversa quando a altura de água está abaixo de outro valor.

```
RULE 1
IF TANK 1 LEVEL ABOVE 19.1
THEN PUMP 335 STATUS IS CLOSED
AND PIPE 330 STATUS IS OPEN

RULE 2
IF TANK 1 LEVEL BELOW 17.1
THEN PUMP 335 STATUS IS OPEN
```

```
AND PIPE 330 STATUS IS CLOSED
```

4.5.3.1 Controlos das condutas

O isolamento de uma conduta é feito através do fecho de válvulas de seccionamento de extremidade. Tal como referido em 4.3.3, não é necessário modelar as válvulas de seccionamento destinadas exclusivamente à abertura ou fecho de uma conduta. A operação deste tipo de válvulas pode ser aplicada directamente sobre a conduta a isolar, alterando o valor do seu estado para *Open* ou *Closed*.

Se uma válvula de seccionamento se encontra parcialmente aberta, funcionando deste modo como uma válvula reguladora, deve ser modelada como uma válvula de controlo (i.e., válvula reguladora de caudal ou de pressão – ver 4.3.10) e o controlo operacional de regulação é aplicado a essa válvula.

Apresentam-se abaixo exemplos de controlos simples em que a conduta 12 é fechada às 10 horas da manhã e é aberta às 8 horas da tarde, ao longo de uma simulação:

```
LINK 12 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM
LINK 12 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM
```

4.5.3.2 Controlos de bombas

As bombas podem estar ligadas ou desligadas, em função do modo como a rede é operada. Para bombas de velocidade variável, os controlos podem introduzir variações de velocidade por forma a poder fornecer os valores de caudal ou de pressão pretendidos.

Tipicamente, as bombas operam em função de factores como a altura de água nos reservatórios e o instante do dia ou de simulação.

No exemplo abaixo ilustra-se a regulação de uma bomba de velocidade variável em função do instante de simulação (hora 16):

```
LINK PUMP02 1.5 AT TIME 16
```

4.5.3.3 Controlos de válvulas

As válvulas de controlo podem estar abertas ou fechadas ou activas. No caso de estarem reguladas (i.e., activas) o valor do parâmetro a regular poder ser alterado, por forma a controlar a grandeza em causa (caudal, pressão ou de perda de carga), num determinado ponto da rede e num dado instante da simulação.

No exemplo abaixo, ilustra-se a regulação de uma válvula reguladora de caudal para 80 l/s.

```
VALVE 153 SETTING IS 80
```

4.5.3.4 Outros aspectos a considerar

A especificação tanto de controlos simples, como de controlos com condições múltiplas, é um exercício de lógica matemática que exige frequentemente algum cuidado na concepção das regras.

Chama-se a atenção para a necessidade não só de um bom domínio da linguagem lógica e dos seus operadores, mas também (e sobretudo) da verificação do funcionamento e dos efeitos das regras operacionais criadas.

Quando estas são complexas, envolvendo a especificação de verificações múltiplas dependentes simultaneamente de condições relativas a momentos no tempo e do estado de elementos do sistema (p.ex., uma bomba que é accionada em função de certos períodos do dia e de certos níveis no reservatório de destino), é possível serem criadas situações de incompatibilidade ou impossibilidade.

Deve ainda notar-se que as condições relativas a momentos no tempo devem ser compatíveis com o passo de cálculo escolhido. Se se estabelece uma condição de accionamento de uma bomba, p.ex., para *t*=09:36, e a simulação corre com um passo de cálculo de 10 mins., com início à hora certa, a condição nunca seria verificada.

5 CALIBRAÇÃO DE MODELOS

5.1 Aspectos gerais

Como já foi anteriormente visto, um modelo é desenvolvido para simular o comportamento de determinado sistema existente ou a construir, para uma dada gama de configurações e de condições ou *cenários* operacionais. Essencialmente, o mesmo conjunto de descritores do sistema físico é utilizado com vários conjuntos de descritores das solicitações (consumos) e dos controlos. Quando o modelo incide sobre um sistema existente, está ao alcance do analista um processo de aferição dos resultados obtidos por forma a (i) aproximá-los na medida do possível da realidade, e (ii) determinar até que ponto tal é conseguido.

Nesta acepção, Cesario (1995) define calibração como o processo de ajuste fino de um modelo até este ser capaz de simular as condições verificadas no sistema para um determinado horizonte temporal (por exemplo, o cenário de ponta horária de consumo),com um grau de exactidão pré-estabelecido.

Walski *et al.* (2003) definem calibração como o processo de comparação dos resultados de um modelo com observações de campo para, se necessário, ajustar os dados que descrevem o sistema até que o comportamento previsto pelo modelo concorde *razoavelmente* com o comportamento verificado na realidade, para uma gama alargada de condições operacionais. A modelação correcta aparece assim essencialmente como um equilíbrio a atingir entre a realidade, a simulação da realidade, e o esforço necessário para fazer as duas concordar, no sentido de satisfazer determinado objectivo de análise.

Assim, e de forma geral, entende-se por calibração de um modelo de qualquer sistema físico o processo de aferição e validação do modelo para diversas condições de funcionamento criteriosamente seleccionadas, de modo a permitir que a sua utilização possa ser feita com confiança suficiente no âmbito da análise pretendida. O modelo calibrado deve permitir inferir sobre o comportamento do sistema relativamente a variáveis do sistema que não são objecto de medição, quer para situações de funcionamento semelhantes às seleccionadas para calibração, quer para situações distintas.

A calibração é feita com base na comparação entre resultados do modelo e resultados de medições realizadas no sistema físico. Assim, o processo de calibração do modelo beneficiará inevitavelmente da realização do maior número possível de

observações das grandezas que reflectem o comportamento do sistema físico a que corresponde.

Partindo do princípio de que não é viável medir e registar essas grandezas em todos os pontos de interesse e em todos os momentos de interesse – caso contrário a utilidade do modelo seria questionável, pelo menos na gestão corrente do sistema – tentar-se-á obter tantas observações quanto possível, e basear a explicação da incerteza remanescente em estimativas *razoáveis.* Com o decorrer do tempo deve haver o cuidado de gerar mais informação sobre o sistema de modo a permitir refinar essas estimativas.

As principais grandezas que reflectem o comportamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água em pressão são o caudal (o que entra ou sai do sistema e o que circula na rede) e a pressão (ou o nível nos reservatórios). Como foi discutido já em 4.4.1 e esquematizado na Figura 4.7 (pág. 95), os principais pontos de interesse para a medição de caudal são as entradas e saídas dos sectores da rede. Um tipo muito particular de caudal é aquele que sai do sistema nos pontos de consumo – extremamente importante por constituir a solicitação ao sistema, e por gerar a principal incerteza associada ao seu funcionamento.

Como foi visto anteriormente, o comportamento de parâmetros de qualidade da água em sistemas de abastecimento de água depende, primeiramente e de forma incontornável, do transporte ao longo dos troços e da mistura nos nós de junção, o que é essencialmente determinado pelo comportamento hidráulico do sistema. A esses efeitos, os modelos actuais adicionam a representação da transformação de parâmetros não-conservativos, para cuja aferição é necessário efectuar medições específicas das respectivas concentrações. Assim, a dependência deste tipo de modelação de uma sólida representação do comportamento hidráulico reforça a importância do caudal (ou velocidade) e da pressão como principais grandezas a monitorizar para efeitos de modelação.

As principais motivações para a recolha de medições de caudal (incluindo medições de consumo) e pressão no âmbito de um processo de modelação, são (i) a estimativa das solicitações e das condições de fronteira do sistema, e (ii) a acumulação de valores característicos do comportamento real do sistema, com os quais os resultados do modelo possam ser comparados e os seus parâmetros aferidos.

No âmbito mais geral da gestão técnica de um sistema, a monitorização das principais grandezas é sobretudo motivada pela necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o seu comportamento e desempenho (ver 4.4.1). Os medidores de caudal são equipamentos considerados relativamente dispendiosos[21], que obrigam a parcimónia e critério na sua localização. Em Portugal, de uma forma geral, só em anos recentes se tem vindo a assistir a um progressivo equipar dos sistemas de distribuição, ainda largamente deficitários no que diz respeito à monitorização. Os sistemas de adução, sobretudo os mais recentes – tais como os sistemas multi-municipais – são por norma bastante mais bem equipados.

As capacidades de medição de caudal e de pressão (incluindo de nível) instaladas numa rede de modo permanente, funcionando isoladamente ou como parte integrante de um sistema de telemedição, devem ser utilizadas no processo de calibração. No entanto, é quase sempre necessário complementar a informação obtida por esta via com medições feitas especificamente para o efeito, através de campanhas de calibração.

5.2 Métodos para calibração de modelos

5.2.1 Conceitos de base

Para se considerar hidraulicamente calibrado, um modelo deverá simular adequadamente tanto os valores do caudal (ou velocidade) como os valores de pressão, não sendo suficiente obter bons resultados em apenas uma destas variáveis.

---

[21] Esta é uma noção progressivamente deslocada, tendo em conta que a medição de caudal serve uma diversidade de finalidades, desde a redução de perdas ao controlo operacional, passando pela acumulação de um histórico essencial para o planeamento dos sistemas. Como ponto de comparação, poderá ser feito o seguinte cálculo ilustrativo: para um sector de rede servindo 5000 habitantes, sujeito a perdas reais de 20% da água entrada no sistema, com uma capitação média de 200 l/hab/dia e um custo médio da água produzida ou importada de 0.50 €/m^3, o custo de aquisição e instalação de um caudalímetro com *datalogger* – incluindo montagem, acessórios, construção da caixa de visita e ligação à rede eléctrica – é inferior ao custo médio da água perdida em apenas 2 meses.

O modelo calibrado deverá obedecer a um determinado grau de exactidão. O grau de exactidão mede a diferença entre os valores resultantes do modelo e os valores (convencionalmente) verdadeiros da grandezas em causa ou, mais pragmaticamente, os valores *medidos* para as grandezas em causa.

O grau de exactidão poderá ser pré-estabelecido, como um requisito prévio para o modelo, dependente dos objectivos a atingir e do tipo de modelação a efectuar. Por outro lado, o grau de exactidão obtido poderá igualmente resultar do próprio processo de calibração e das limitações de tempo ou dos recursos disponíveis. No entanto, é fundamental a noção de que o grau de exactidão resultante é uma característica própria de cada modelo, que influencia directamente a fiabilidade dos seus resultados.

Por outras palavras, a leitura dos resultados de um modelo deverá sempre ser feita tendo em vista o seu grau de exactidão – um erro que infelizmente se constata com frequência é a atribuição implícita de uma exactidão exagerada aos resultados de um modelo, em face da qualidade dos dados de entrada, e a consequente utilização desses resultados para inferências mal sustentadas.

De forma geral, a fase de calibração permite cumprir os seguintes objectivos (Alegre, 1990; Cesario, 1995 ; Walski *et al.*, 2003):

(i) Estabelecer o grau de fiabilidade do modelo.

Não há qualquer garantia de que os dados introduzidos num modelo não calibrado para descrever o sistema, as suas solicitações e a sua operação, reflictam as condições reais do terreno. A utilização de modelos não calibrados de sistemas existentes[22] é uma prática a evitar, e que deve apenas ter lugar para ganho de sensibilidade – certamente sem perder de vista a limitada fiabilidade dos resultados.

Pelo contrário, num modelo calibrado, o grau de exactidão dos resultados é passível de ser estimado. A calibração do modelo consiste, neste particular, num método de teste tanto dos dados de entrada como das hipóteses colocadas na construção do modelo, e serve para demonstrar a capacidade

---

[22] Quando se trata de um modelo para dimensionamento de uma rede ou de uma expansão a construir, a questão não se coloca.

do modelo para reproduzir as condições existentes, a um nível de confiança coerente com os objectivos do modelo e com os recursos empregues no seu desenvolvimento.

(ii) Adquirir ou aprofundar o conhecimento sobre o funcionamento do sistema, a sua operação e o seu desempenho.

O processo de calibração de um modelo proporciona um avanço significativo no entendimento sobre o comportamento e desempenho do sistema. Constitui uma profunda análise de sensibilidade que permite uma identificação dos dados ou configurações que mais influenciam os resultados, possibilitando ao modelador concentrar-se preferencialmente no ajuste destes, e simultaneamente revelando quais as variáveis que poderão ter mais impacto em termos da utilização pretendida para o modelo.

(iii) Descobrir e eliminar erros nos dados ou falhas no conhecimento do sistema.

Para além da missão primária de identificar e corrigir erros nos dados introduzidos aquando da construção do modelo, a fase de calibração permite muito frequentemente corrigir a própria visão ou entendimento do sistema fornecida pelos seus responsáveis directos. Não é raro descobrir-se elementos não cadastrados ou esquecidos, ligações inesperadamente abertas ou fechadas, ou ainda regulações de componentes (p.ex., válvulas) que se verifica estarem em oposição à convicção dos operadores.

Para além destes objectivos, a fase de calibração permite não raras vezes identificar problemas no próprio sistema, e não deve ser descartado um conjunto de dados de modelação racionalmente construídos sem colocar a hipótese de algo imprevisto ou desconhecido poder ter ocorrido – tal como ligações não mapeadas, grandes fugas, medidores defeituosos, bombas em mau estado, obras incompletas ou mal acabadas, ou condutas bloqueadas por materiais utilizados nos trabalhos de manutenção.

5.2.2 Fontes de erro na modelação

As discrepâncias entre os resultados do modelo e a realidade observada podem ter múltiplas origens, entre os dados utilizados para descrever o sistema, as suas solicitações e condições de fronteira, e as suas condições operacionais.

Numa abordagem imediata, a calibração de um modelo poderá ser vista como o ajustamento, até ser obtida a concordância de valores de pressão e caudal, dos valores das duas grandes fontes de incerteza nos dados originais: a rugosidade interna das condutas e os consumos nominais nos nós, as duas variáveis de base que podem apenas ser estimadas, contrariamente ao comprimento e diâmetro das condutas e aos restantes elementos que podem ser especificamente medidos, se necessário for.

No entanto, são muitas mais as possíveis fontes de erro ou de incerteza nos dados de entrada de um modelo, que poderão contribuir para discrepâncias entre resultados do modelo e medições na rede. Qualquer dessas possíveis origens de erros constitui um potencial parâmetro de calibração, razão pela qual é importante revê-las aqui:

(i) Coeficiente de rugosidade das condutas.

Como foi referido em 4.3.4, este é um dos principais factores de incerteza na especificação de um modelo. A estimativa de coeficientes de perda de carga tem justificado a realização de uma grande quantidade de estudos, sendo inúmeras as referências disponíveis sobre os diversos materiais de tubagem, a evolução da perda de carga com a idade (e.g. Cesário, 1985 e Walski *et al.*,2003) e com outros factores de influência.

A determinação de coeficientes de rugosidade especificamente para o sistema em estudo deverá passar por testes de campo. A introdução de factores correctivos deverá ser cuidadosa e respeitar o princípio de não alterar mais do que um pressuposto de cada vez, sob pena de se perder sensibilidade aos reais efeitos dos ajustes.

Deve manter-se presente que, em sistemas com baixas perdas de carga – relativamente frequentes, sobretudo em sectores de distribuição com consumos pouco concentrados, em que a imposição de diâmetros mínimos tem como efeito velocidades muito baixas – o efeito do coeficiente de perda de carga unitária é pouco importante. Nestas circunstâncias, um modelo pode fornecer resultados plausíveis mesmo a partir de estimativas pouco trabalhadas dos coeficientes de perda de carga. Tal não significa que esteja calibrado à partida, e que o processo de calibração possa consequentemente ser dispensado.

(ii) Atribuição de consumos aos nós.

Do que foi mencionado em 4.4.5, resulta clara a grande importância, mas também a dificuldade, de uma boa estimativa da distribuição espacial e temporal de consumos. Vários factores contribuem para que a especificação das solicitações seja a principal incógnita de um modelo.

A simplificação assumida à partida, de que o consumo está concentrado nos nós, implica desde logo uma cuidadosa localização destes. Por outro lado, essa concentração provoca perdas de carga diferentes daquelas que ocorreriam se o consumo fosse representado onde efectivamente ocorre, ou seja, nos ramais ao longo das condutas (Figura 5.1). A diferença é tanto maior quanto mais longe esteja situado o consumo em relação ao nó da conduta a que está atribuído.

De modo geral, estas diferenças não são significativas, mas devem ser tomadas em conta na leitura de resultados de modelos que pretendam muito detalhados, para efeitos, p.ex., de modelação de qualidade da água.

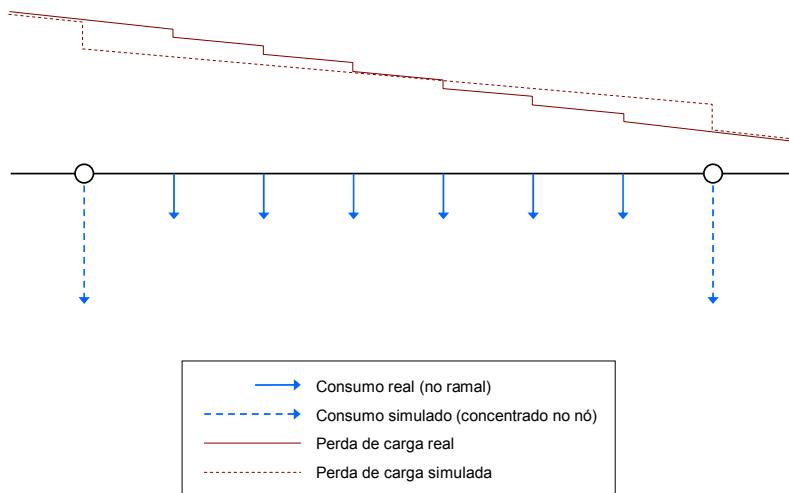



Figura 5.1 – Perda de carga e localização dos consumos ao longo de uma conduta.

Os outros factores de dificuldade na atribuição de consumos foram já descritos em 4.4.5, mas valerá a pena realçar a necessidade de um cuidadoso tratamento da informação

temporal e de uma interpretação criteriosa do modelo, quando é utilizada a simulação em período alargado. A comparação de valores gerados a partir de padrões de consumo normalizados com as medições de campo ocorridas num determinado dia deve ser entendida com os devidos cuidados.

A estimativa de consumos para efeitos tanto da sua distribuição espacial como da sua variação temporal é feita a partir de valores médios esperados, em torno dos quais o comportamento humano se encarrega inevitavelmente de garantir desvios imprevisíveis (ver 4.4.4 Aspectos ligados à representação determinística do consumo). É necessário saber procurar, com paciência e lógica, explicações locais no tempo e no espaço, para tais desvios – como um particular consumo localizado causado pelo enchimento de camiões-cisterna dos bombeiros, ocorrido no dia dos testes de campo, ou a errada atribuição do ramal de um grande consumidor a uma determinada conduta, quando na realidade está ligado a uma conduta paralela que se pensava não ter consumo de percurso.

(iii) Diâmetro nominal e diâmetro interno.

Mencionou-se em 4.3.4 que é possível o diâmetro nominal de uma tubagem não corresponder ao seu diâmetro interno, seja pela forma de especificação da tubagem utilizada, seja porque existe deposição ou tuberculização no interior da conduta (ver exemplo da Figura 4.1, na pág.69).

A solução frequentemente adoptada, quando se verificam reduções difíceis de estimar no diâmetro interno da tubagem, é a de utilizar na primeira aproximação o diâmetro nominal, e ajustar o coeficiente de rugosidade para compensar o efeito da redução de secção útil na perda de carga. Se tal solução for adoptada, não deverá deixar de ser registada no manual do modelo. Deve notar-se que uma alteração no valor do diâmetro tem um efeito muito mais pronunciado na perda de carga unitária resultante, do que a mesma alteração (em termos relativos) no valor da rugosidade.

É contraproducente ajustar simultaneamente os valores do diâmetro e da rugosidade, pois perde-se sensibilidade ao efeito dos ajustes, e aumenta-se desnecessariamente o número de dados a alterar.

O coeficiente de rugosidade é um parâmetro de calibração que permite uma aferição intuitiva da qualidade do modelo, uma vez que tem uma gama de variação expectável. Utilizando o coeficiente C de Hazen-Williams, p.ex., sabe-se à partida que valores inferiores a 40 ou superiores a 150 não são prováveis, o que indicia imediatamente outros problemas no modelo, tais como perdas de carga localizadas devidas a válvulas mal abertas.

(iv) Registos de cadastro.

A qualidade do cadastro, seja no suporte de papel, seja em versão digital, é um dos principais factores que influenciam o trabalho de construção do modelo. As considerações tecidas em 4.3.2 devem estar sempre presentes no teste e calibração das sucessivas versões do modelo.

(v) Erros de conectividade.

Na construção de um modelo, podem ocorrer erros de desenho da rede que se reflectem em conectividade errada por comparação com o sistema real – ou seja, representando ligações entre elementos de uma forma que não corresponde à realidade. Estes erros são comuns e podem ocorrer tanto por lapso humano na introdução manual dos dados, como na geração do traçado da rede por via automatizada.

Quando uma rede é desenhada manualmente no simulador, é frequente, p.ex., a inserção de um nó de intersecção num lugar onde duas condutas apenas se cruzam, por tal não ser imediatamente aparente nos desenhos cadastrais de origem. Outros erros de interpretação da informação original, ou erros de especificação por parte do analista, são habituais e podem reflectir-se numa conectividade diferente daquela que ocorre na realidade.

Por outro lado, tal como se viu em 4.3.11, a geração automatizada do traçado da rede a partir de um SIG ou de cadastro digitalizado pode gerar um grande número de problemas de conectividade alterada, devido ao mecanismo de leitura interpretar erradamente a proximidade de nós e outros factores. Recorde-se que a representação da rede naqueles sistemas digitais nem sempre é realizada com a mesma discretização de condutas, ou utilizando a topologia de troços delimitados por nós em que os modelos de simulação se baseiam. Os algoritmos de exportação utilizam interpretações e adaptações sujeitas a erros. A verificação

de conectividade é, nestes casos, uma etapa imprescindível da geração do traçado da rede, devendo manter-se presentes as observações feitas a este respeito na página 91.

Os erros de conectividade podem resultar em erro do modelo – o simulador não consegue resolver a rede e dá indicação de que algo está mal especificado – mas podem igualmente resultar num modelo que aparentemente funciona. É nesta acepção que os erros de conectividade constituem um dos aspectos a ter em conta na calibração de um modelo, até porque os resultados da simulação podem ser plausíveis ou com discrepâncias não imediatamente atribuíveis a um problema deste tipo.

(vi) Simplificação da rede.

A simplificação de um sistema para efeitos de modelação, por exemplo através da consideração apenas das condutas com diâmetro superior a 200 mm, pode resultar na eliminação não-intencional de troços cruciais para o funcionamento do sistema. O cálculo do respectivo equilíbrio hidráulico levará a soluções diferentes daquelas que ocorrem na realidade, e à consequente impossibilidade em calibrar convenientemente o modelo. Trata-se de um tipo de erro com sintomas semelhantes, p.ex., à consideração errada do estado de uma válvula, por interpretação incorrecta da informação cadastral, ou por esta não ser fiável.

A eliminação de troços cruciais por simplificação pode ser pontual e resultar de lapsos na leitura que se faz do comportamento hidráulico do sistema aquando da construção do modelo, mas pode também ser mais disseminada, como consequência de uma simplificação exagerada.

(vii) Níveis e condições de operação de reservatórios e instalações elevatórias.

Os desenhos e dados de que se dispõe relativamente à geometria e cotas de reservatórios contêm por vezes imprecisões significativas, resultantes de as telas finais não corresponderem exactamente à obra construída, e de esses documentos não terem sido convenientemente verificados na recepção final. Na construção de um modelo, é aconselhável a verificação *in loco* das dimensões e cotas mais importantes, bem como da geometria e configuração das células.

Da mesma forma, a verificação das condições operacionais relativas a níveis – nível de soleira, nível máximo e, caso a

entrada seja em queda, nível máximo da conduta de entrada – é fundamental e deve envolver a participação activa dos operadores de rede. O mesmo se poderá dizer das configurações de válvulas (p.ex., consignas de caudal de entrega) e das condições operacionais das instalações elevatórias.

Finalmente, a verificação das curvas das bombas é condição essencial para uma correcta modelação do seu funcionamento. A curva de uma bomba com bastantes anos de serviço pode diferir significativamente da especificação original do fabricante, sobretudo se a manutenção do equipamento foi deficitária.

Rever, a este respeito, as considerações sobre reservatórios, válvulas e bombas em 4.3, bem como as observações relativas às fichas técnicas de modelação em 4.3.12.

O trabalho adicional acarretado por estas verificações não é normalmente significativo, uma vez que o número destas instalações num modelo é habitualmente pequeno. Exceptuam-se os modelos de sistemas de transporte regional, do tipo multi-municipal, com um largo número de reservatórios de entrega. No entanto, e uma vez que estes modelos são particularmente sensíveis a uma correcta representação das instalações especiais, também aqui se justifica plenamente o trabalho adicional.

5.2.3 Abordagem geral e tipos de intervenção

A calibração de modelos de simulação envolve essencialmente dois tipos diferentes de intervenção:

1. a realização de testes específicos e localizados em subconjuntos da rede, em condições de funcionamento que não correspondem às condições normais de operação da rede, mas que se destinam a avaliar grandezas como sejam as perdas de carga localizadas e os coeficientes de perda de carga das condutas; a secção 5.3 (Monitorização e teste de sistemas) aborda este assunto;
2. a realização de comparações estruturadas e sistematizadas entre medições feitas durante cenários de operação típicos (hora de ponta e de vazio; períodos diferentes do ano; condições específicas de operação; etc.) e os valores correspondentes obtidos através do modelo; este segundo tipo de intervenção corresponde à calibração do modelo propriamente dita e incorpora os resultados obtidos nos testes referidos no ponto anterior; a secção 5.4 (Procedimento de calibração) explica como planear e pôr em prática este tipo de actividade.

5.3 Monitorização e teste de sistemas

5.3.1 Medição de pressão

A medição de pressões fornece dados essenciais para calibração de modelos, ganho de sensibilidade ao sistema, e resolução de variados problemas operacionais. A pressão é um dos principais indicadores operacionais no dia-a-dia de um sistema de distribuição, reflectindo-se directamente na qualidade do serviço prestado ao consumidor. Por outro lado, é em geral menos dispendioso e tecnicamente mais fácil medir pressões do que caudais. Embora os dois tipos de medida não constituam alternativa uma à outra, o conhecimento das pressões em determinados pontos da rede ajuda muito a verificar se os caudais resultantes do modelo se afastam significativamente dos caudais que realmente circulam no sistema.

As medições de pressão podem ser efectuadas em qualquer ponto de acesso ao interior das condutas, desde os hidrantes e bocas de incêndio, bocas de rega e simples torneiras de serviço,

até às purgas, tomadas em pressão e inúmeros outros acessórios dos sistemas.

A pressão é medida através de manómetros, equipamentos portáteis ou fixos, analógicos ou digitais, com leitura instantânea apenas, ou com a capacidade de registo através de *datalogger*. Os equipamentos fixos podem estar ou não ligados a sistemas de telemedição. Também existem equipamentos portáteis capazes de transmitir dados à distância através de transmissores rádio ou GSM (Figura 5.2).

(a)

(b)

Figura 5.2 – Manómetros: (a) analógico, montado em marco de incêndio; (b) digital, com *datalogger* e transmissor GSM.

Os manómetros portáteis utilizados para medições pontuais ou temporárias através da rede são acoplados a hidrantes ou bocas de rega através de adaptadores específicos. È vantajoso possuírem uma purga de ar, pois acumula-se sempre algum ar na tomada de pressão antes da abertura da torneira.

Os manómetros equipados de datalogger têm grande vantagem sobre os que apenas proporcionam leituras instantâneas, pois podem ser deixados a registar durante o período de duração da campanha e obter assim uma maior quantidade de informação, com menor dispêndio de mão-de-obra, e em formato passível de ser processado computacionalmente. Permitem ainda lidar de modo mais eficaz com a necessidade de sincronismo entre um conjunto de medidores, por exemplo para acções de calibração de

modelos, em que é necessário efectuar medições em simultâneo em vários pontos da rede.

5.3.2 Medição de caudal

A medição de caudais num sistema de abastecimento de água é efectuada através de medidores de diversos tipos, em pontos-chave que incluem entradas e saídas de reservatórios, estações elevatórias, e entradas e saídas de sistemas, subsistemas e sectores de abastecimento, incluindo as zonas de medição e controlo de perdas.

A medição de caudal em sistemas de abastecimento de água é uma disciplina que exige um conhecimento aprofundado tanto das características dos equipamentos utilizados como das condições em que as medições são obtidas.

Os tipos de medidores geralmente disponíveis no mercado para as gamas de diâmetros habitualmente utilizadas em sistemas de abastecimento de água incluem:

- medidores mecânicos, normalmente tipo turbina ou Woltman, com a possibilidade de ligação a um registador mecânico ou a um gerador de impulsos;
- medidores electromecânicos, em que a rotação de uma turbina é electronicamente convertida para valores analógicos ou de frequência;
- medidores electromagnéticos não-intrusivos, baseados na leitura das variações de um campo electromagnético, produzindo valores analógicos ou de frequência;
- medidores ultrasónicos não-intrusivos, estimando o caudal a partir do tempo de percurso de um sinal ultrasónico emitido transversalmente à conduta, e produzindo valores analógicos ou de frequência;
- medidores de intrusão, electromecânicos ou electromagnéticos, montados na extremidade de uma haste que é inserida na conduta através de uma tomada em carga.

Os medidores ultrasónicos portáteis e os medidores de intrusão, embora mais dispendiosos, podem ser instalados e removidos com facilidade e sem necessidade de alterações à conduta, pelo que permitem uma maior flexibilidade de utilização.

Os principais aspectos a tomar em linha de conta na selecção de medidores de caudal são os seguintes:

- gama de valores medidos;
- exactidão;
- repetibilidade;
- perda de carga introduzida;
- vulnerabilidade a substâncias ou materiais presentes na água;
- possibilidade de medir caudais nos dois sentidos (em casos em que possa haver reversão do sentido do escoamento);
- exigências de instalação e manutenção;
- custos de aquisição, instalação, operação e manutenção.

A gama de medição e a exactidão do medidor de caudal devem naturalmente ser ajustados ao fim a que se destinam, sendo sobretudo importante garantir que os caudais mais baixos são correctamente medidos, por ser no extremo inferior da escala que os medidores apresentam mais frequentemente uma precisão pouco adequada.

É bastante comum encontrar medidores de caudal de diâmetro igual ao da conduta em que estão instalados. No entanto, é frequente as condutas dos sistemas de abastecimento se encontrarem sobredimensionadas, sobretudo nas sectores de distribuição, seja pela imposição de diâmetros mínimos, seja pela necessidade de satisfazer factores de ponta de projecto exagerados ou caudais de combate a incêndio.

Nestas circunstâncias, o caudal que nelas circula é, na maior parte do tempo, muito baixo, levando a uma maior imprecisão dos valores medidos. Para maior eficácia na medição, é comum nestes casos utilizar um medidor de menor calibre, através da introdução de cones de redução, desde que a tal não corresponda uma perda carga que reduza significativamente o desempenho da conduta (o que normalmente não será o caso, dado as velocidades serem baixas).

Tal como se referiu a propósito dos medidores de pressão, e caso o equipamento não esteja ligado a um sistema de telemetria, existem grandes vantagens em dotar os medidores de caudal de *dataloggers* que permitam o registo electrónico, automático e consistente dos valores medidos.

5.3.3 Estimativas de caudal através da medição da variação de volume em reservatórios

Na ausência de medidor de caudal, é frequente poder utilizar-se a variação do volume armazenado no reservatório que abastece o sector em causa, num determinado intervalo de tempo, como uma estimativa do caudal fornecido. Esta solução, embora permita obter valores na ausência de um medidor adequado, deve ser encarada com alguma precaução, sobretudo para os reservatórios de maior diâmetro (ou superfície horizontal), pelos seguintes motivos:

(i) É comum a altura de água ser medida com uma escala em centímetros, a cujas leituras corresponderá um erro não inferior a ± 0.5 cm. Para um reservatório de 12 metros de diâmetro, tal dará origem a um erro no cálculo da variação de volume de cerca de ± 0.57 m^3; para 15 m de diâmetro, o erro será de ± 0.88 m^3. Dependendo do passo temporal em que é efectuado o cálculo, estes erros poderão ser significativos para a estimativa de caudais de abastecimento a sectores de distribuição comuns;

(ii) na utilização de medições diferenciais de altura (volume) em reservatórios, é normalmente impossível obter um registo "totalizador" das variações de altura, ao contrário do que acontece num medidor de caudal. Caso o registo não seja efectuado com uma frequência superior àquela com que ocorre a alternância entre enchimento e esvaziamento do reservatório, será impossível efectivamente medir o verdadeiro caudal escoado. O erro resultante deste efeito pode ser significativo.

Note-se ainda que, quanto maior for a frequência de medição (no sentido de minimizar o efeito descrito em (ii)), mais significativo será o erro a que se refere o ponto (i), por ser menor o caudal escoado em intervalos de tempo mais curtos.

5.3.4 Testes de rede

No domínio da construção e calibração de modelos, a designação de *testes de rede* é aplicada a um conjunto de práticas de aplicação caso-a-caso, destinadas a obter estimativas específicas de certos parâmetros do sistema, como os coeficientes de perda de carga ou os diâmetros internos de condutas incrustadas.

Embora possam utilizar equipamento já instalado nos sistemas, os testes de rede requerem quase sempre equipamento portátil, pois são realizados nos mais variados locais do sistema, em função

das necessidades de aferição do modelo. Descrevem-se seguidamente alguns dos testes de maior utilidade.

5.3.4.1 Testes de perda de carga

Os testes de perda de carga destinam-se a estimar ou ajustar os valores atribuídos à rugosidade interna das condutas. O objectivo de um teste deste tipo é determinar a diferença de cota piezométrica entre dois pontos de uma determinada conduta, na qual o caudal é conhecido ou passível de ser estimado. A perda de carga assim deduzida, bem como o valor do caudal, são introduzidos na fórmula de perda de carga escolhida, para determinação do parâmetro de rugosidade necessário. Utilizando o exemplo da fórmula de Hazen-Williams já anteriormente referido (2.3.2)

$$Q = \beta \, C_{HW} D^{2.63} \, h^{0.54} \qquad (15)$$

Sendo Q o caudal, C o coeficiente da fórmula de perda de carga, D o diâmetro interna da conduta e h a perda de carga contínua.

O teste deverá ser realizado para o caudal mais elevado que é possível gerar na conduta, no sentido de maximizar a perda de carga provocada. Na realização do teste, é igualmente importante começar por uma situação estática (de caudal nulo), em que a perda de carga é teoricamente zero, para permitir aferir o equipamento de medição de pressão.

Para a realização de um teste de perda de carga, deverão ser verificados os seguintes requisitos:

- troço de conduta com comprimento conhecido ou mensurável, de diâmetro interno constante e conhecido23, inteiramente construído no mesmo material, no mesmo estado de conservação, sem singularidades importantes (tais como curvas, cotovelos, válvulas ou estreitamentos) e sem consumo ou alimentação de percurso (caudal constante);
- velocidade de escoamento elevada (não excedendo 3.0 m/s);
- cotas de terreno nos pontos extremos de medição bem conhecidas (uma precisão da ordem de 0.10 m é recomendável);

---

[23] A não ser que o objectivo do teste seja justamente estimar o diâmetro interno, em condutas em que este se apresente bastante alterado.

- possibilidade de medição de pressão nesses dois pontos, através de uma torneira, uma boca de rega ou um hidrante;
- leituras de caudal sincronizadas com as leituras de perda de carga/pressão.

Para se conseguir caudal constante, poderá ser necessário fechar temporariamente ligações domiciliárias ou válvulas de isolamento de sector, durante o teste. A necessidade de limitar a velocidade de escoamento tem a ver com a gama de validade das equações empíricas de perda de carga, utilizadas para a estimativa.

Há várias formas de realizar este tipo de testes, consoante o equipamento e condições disponíveis.

As principais condicionantes à realização de testes de perda de carga – para além da disponibilidade de pontos de acesso, como os hidrantes – são a capacidade para estimar a diferença de cota piezométrica, a qualidade da informação sobre cotas do terreno e a capacidade para medir caudais.

Para estimar a diferença de cota piezométrica, podem ser utilizados dois métodos distintos de medição da pressão:

A) Medição por manómetro diferencial - consiste em isolar um troço de conduta entre dois hidrantes e colocar uma conduta de pequeno diâmetro em paralelo ao troço em análise,, ligada a este através dos hidrantes. Um manómetro para registo do diferencial de pressão entre os hidrantes é instalado na conduta em paralelo (Figura 5.3). O manómetro diferencial permite obter directamente a diferença de cota piezométrica entre hidrantes, pelo que este método de medição dispensa o conhecimento das cotas de terreno. Este método é particularmente adequado em condutas curtas.

B) Medição por manómetros comuns – consiste em medir a pressão nos dois hidrantes de extremidade da conduta usando manómetros comuns (Figura 5.4). Para se determinar a diferença de cota piezométrica entre hidrantes é necessário conhecerem-se as cotas de terreno com precisão adequada.

Para estimar caudais, podem igualmente ser utilizados dois métodos distintos:

I) Medição na conduta - consiste em medir o caudal a partir de um medidor instalado na própria conduta (Figura 5.4). Este método não invalida o uso de um hidrante a jusante para descarga, provocando um aumento adicional de caudal na conduta em teste. O uso do hidrante a jusante para descarga

pode ser motivado apenas pela necessidade de criar condições de escoamento adequadas à realização do teste ou para se garantir que potenciais usos de água não isolados ao longo da conduta sejam desprezáveis face ao caudal total medido na conduta. Para minimizar o efeito de pontos de consumo (ramais) não isolados, deve realizar-se o teste em períodos em que o consumo seja reduzido e pouco variável (p.ex., período nocturno).

II) Medição ou estimativa no hidrante – consiste em medir ou estimar o caudal de descarga num hidrante localizado a jusante da conduta principal em análise (Figura 5.3). Nos casos em que não seja possível equipar o hidrante com um medidor de caudal, pode obter-se o caudal por estimativa (p.ex., medindo o volume de água escoado num intervalo de tempo cronometrado).

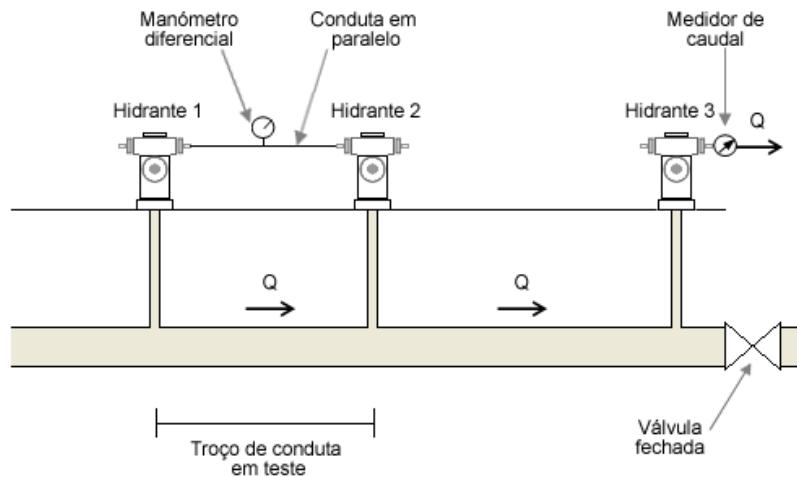



Figura 5.3 – Teste de perda de carga com medição da perda de carga por manómetro diferencial (A) e com medição do caudal de descarga no hidrante (I).

Uma das principais aplicações dos testes de perda de carga é a calibração do parâmetro de rugosidade das condutas, no desenvolvimento de modelos de simulação. A cobertura dos testes de perda de carga na rede depende do equipamento disponível e dos pontos de acesso existentes. Uma das formas de limitar o número de testes de perda de carga consiste em definir condutas

representativas da rede, obtidas com base em agrupamentos definidos a partir das suas características (p.ex., idade, diâmetro, material). A realização deste tipo de testes, como vista à calibração, requer um conhecimento preciso do estado das válvulas na rede e a sua caracterização no modelo da rede.

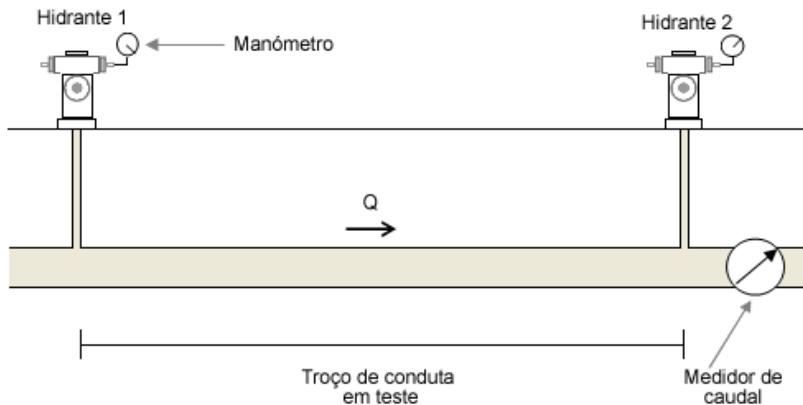



Figura 5.4 – Teste de perda de carga com medição da pressão em dois manómetros comuns (B) e com medição de caudal na conduta (II) , ou caudal conhecido.

5.3.4.2 Teste de caudal de incêndio

Os testes de caudal de incêndio são utilizados para verificar a capacidade de um determinado hidrante (ou conjunto de hidrantes) para fornecer o caudal requerido para combate a incêndio, avaliar o impacto dessa solicitação excepcional no desempenho da rede circundante, e suportar a calibração de um modelo.

Para a realização de um teste de caudal de incêndio é necessário dispor-se de pelo menos dois hidrantes. Um hidrante é utilizado para medição da pressão, recorrendo a um manómetro comum, e outro é utilizado para medir ou estimar o caudal descarregado. Podem ser utilizados múltiplos hidrantes se um único hidrante não for suficiente para gerar uma perda de carga adequada na conduta.

Tipicamente, é necessária uma perda de carga de pelo menos 70 kPa (0.7 bar) para produzir resultados fiáveis. Os hidrantes devem estar o mais próximos possível entre si, e localizados na mesma conduta se possível (Figura 5.5). Antes da abertura do(s) hidrante(s) de descarga, regista-se a pressão no hidrante onde esta grandeza está a ser medida, a qual deve ser constante para uma leitura fiável. Designa-se este valor inicial de pressão por *pressão estática*. Após leitura da pressão estática, abre(m)-se o(s) hidrante(s) para gerar as condições de escoamento pretendidas e, após estabilização das condições de escoamento para o valor máximo de caudal, lê-se novamente a pressão, designada por *pressão residual*.

A diferença entre a pressão estática e residual constitui uma medida da capacidade hidráulica do sistema. Uma pequena diferença indica que se trata de um sistema com elevada capacidade hidráulica; uma grande diferença pode ser uma indicação de uma obstrução, como seja uma válvula parcialmente fechada, ou de um sistema com baixa capacidade hidráulica.

Quando existe equipamento disponível, podem obter-se leituras de pressão em vários pontos do sistema, durante o teste de caudal de incêndio.

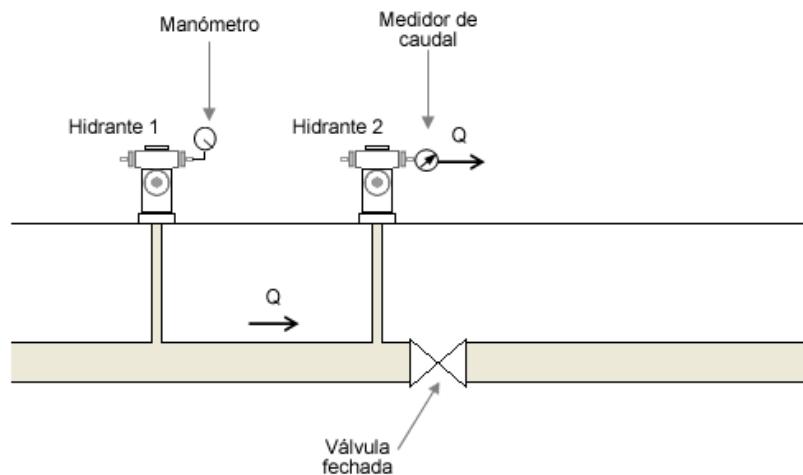



Figura 5.5 – Teste de caudal de incêndio.

Se o teste de caudal de incêndio for realizado com o objectivo de calibrar um modelo, é extremamente importante registar também as condições de fronteira durante o teste, como sejam o nível de água nos reservatórios e o estado de operação de válvulas (por exemplo, válvulas redutoras de pressão) e de instalações elevatórias e sobrepressoras. Importa também registar o instante do dia e a época do ano em que foi realizado o teste, de forma a ser possível reproduzir o cenário de consumos durante o teste no modelo.

Outro aspecto importante, em termos de modelação, prende-se com a necessidade de fazer coincidir a localização dos nós de modelação que representem os hidrantes com a localização real destes na rede.

5.3.4.3 Teste de bombas

A eficiência e características de funcionamento de uma bomba podem diferir daquelas especificadas pelo fabricante, devido às condições de instalação ou, mais frequentemente, ao desgaste provocado pela sua utilização ao longo dos anos, sobretudo quando a manutenção é deficiente.

A verificação ou ajuste *in loco* da curva de uma bomba é um elemento importante para o conhecimento da sua capacidade e desempenho reais, bem como para a sua eficaz representação num modelo.

A curva característica de uma bomba é desenvolvida obtendo valores de altura de elevação para um conjunto de correspondentes valores de caudal. De acordo com a Figura 5.6, aplicando a equação da conservação da energia entre as secções de aspiração e compressão, obtém-se a seguinte expressão:

$$h_b = \left(\frac{P_{com}}{\gamma} - \frac{P_{asp}}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_{com}^2}{2g} - \frac{V_{asp}^2}{2g} \right) + h_c + h_L \qquad (16)$$

sendo: h_b – altura de água na bomba; P_{com} – pressão na conduta de compressão; γ - peso volúmico da água; P_{asp} – pressão na conduta de aspiração; V_{com} – velocidade do escoamento na secção onde é medida a pressão P_{com}; g – aceleração da gravidade; V_{asp} – velocidade do escoamento na secção onde é medida a pressão P_{asp}; h_c – perda de carga por atrito; e h_L – perda de carga localizada.

Para se obter a curva característica da bomba, o operador pode fazer variar o caudal bombeado recorrendo à manobra de uma válvula instalada na conduta de compressão. Com a bomba ligada e, após estabilização do escoamento com a válvula completamente aberta, registam-se os valores de pressão nas condutas de compressão e de aspiração, assim como o caudal bombeado. Substituindo os valores medidos na equação (16), obtém-se a altura de elevação. Em seguida, ajusta-se ligeiramente o grau de abertura da válvula e um novo conjunto de dados de pressão e caudal é obtido. Este processo é repetido, reduzindo sucessivamente o grau de abertura da válvula até se obter um número de pontos suficiente para se construir a curva característica da bomba. A curva característica da bomba deve ser desenvolvida fazendo variar o caudal desde o ponto de caudal máximo ao ponto de funcionamento em vazio. Em certos casos, pode ser necessário operar hidrantes ou válvulas para se obterem valores de caudal suficientemente elevados.

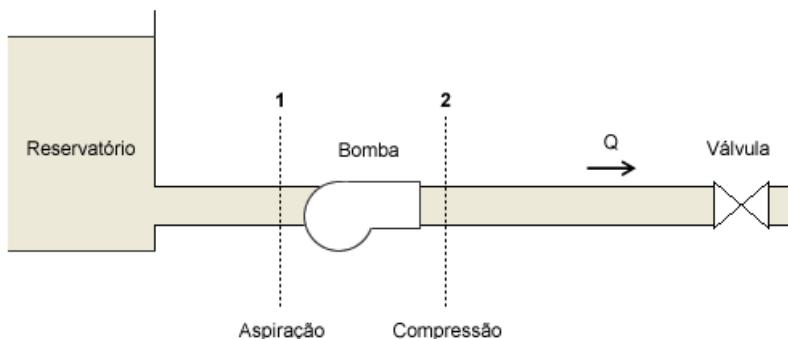



Figura 5.6 – Teste de bomba.

Se a bomba estiver equipada com manómetros na conduta de aspiração e de compressão, a altura de elevação pode ser facilmente obtida. Contudo, em certos casos, existe apenas um manómetro na conduta de compressão. Neste caso, a pressão na conduta de aspiração não é conhecida. Esta pode ser determinada utilizando a equação da conservação de energia entre um ponto de cota piezométrica conhecida (p.ex., um reservatório) e a secção onde se pretende medir a pressão na conduta de aspiração. Note-se que todas as perdas de carga entre os dois pontos devem ser consideradas.

5.4 Procedimento de calibração

A calibração de um modelo é um processo iterativo, cujos passos principais são repetidos até determinadas condições de aceitabilidade serem verificadas. A calibração de um modelo deverá sempre ser efectuada em função dos objectivos a que se destina, e tomar em consideração a qualidade dos dados utilizados para o construir.

O conceito básico é simples: correr o modelo e comparar os resultados com medições de campo; se a diferença for superior à tolerância de erro pré-estabelecida, introduzir ajustamentos e voltar a correr o modelo. Implica, no entanto, um procedimento sistemático que passará pelos seguintes passos (Alegre, 1991; Walski, 1990, 1995; Cesario, 1995; Lansey *et al.*, 2001):

(i) identificação do uso que se pretende dar ao modelo;

(ii) estabelecimento de um cenário-tipo para a comparação;

(iii) revisão das condições operacionais e, se necessário, de outros parâmetros do modelo;

(iv) recolha de dados de calibração;

(v) simulação inicial do processo iterativo;

(vi) macro-calibração;

(vii) análise de sensibilidade; e

(viii) micro-calibração ou ajustamento fino.

O número de iterações necessárias para completar o processo é muito variável, dependendo da tolerância final requerida, da complexidade da rede, da qualidade dos dados descritivos do sistema e da modelação dos consumos, entre outros factores[24].

Os objectivos do modelo determinam à partida o seu nível de detalhe, o tipo de resultados desejado e consequentemente o grau de precisão pretendido, condicionando assim a tolerância máxima

[24] Em igualdade de circunstâncias, redes com mais troços poderão induzir calibrações mais longas, pela complexidade acrescida. No entanto, cada caso é um caso – dificilmente se encontrará igualdade de circunstâncias entre dois modelos, dada a multiplicidade de factores envolvidos.

a obter entre as medições de campo e os resultados das simulações.

O passo seguinte do procedimento consiste na escolha do(s) cenário(s)-tipo para comparação dos resultados do modelo com as medições de campo. Pode optar-se por calibrar o modelo para um cenário estático, ou seja, para determinada hora do dia (p.ex., a hora de maior consumo); ou procurar uma calibração para um cenário em período alargado (p.ex., determinado dia da semana).

No caso de modelos para utilização em simulação estática, sendo possível calibrar para apenas um cenário, será sempre vantajoso verificar o modelo para vários cenários possíveis, pelo ganho de sensibilidade que tal pode trazer, por um lado, e pela confiança acrescida nos resultados do modelo, por outro. A calibração para cenários de variação no tempo (simulação em período alargado, ou SPA) corresponderá a uma maior exigência e grau de dificuldade.

A selecção do(s) cenário(s) de calibração depende igualmente dos objectivos do modelo e deverá contemplar o teste das condições operacionais que sejam mais significativas para a sua simulação. A escolha do tipo de modelo a desenvolver, na fase de planeamento (ver 0), deverá ter tomado em consideração as capacidades e viabilidade de calibração.

A revisão das condições operacionais correspondentes ao(s) cenário(s) de calibração destina-se a garantir que, da gama de configurações identificadas e eventualmente descritas na especificação inicial do modelo, é utilizada a combinação correcta na acção de calibração. Passar-se-á o mesmo com qualquer dos parâmetros do modelo que possam ser específicos do(s) cenário(s) escolhido(s).

A recolha de dados de calibração poderá então dar-se, dentro de cada cenário de calibração, constituindo uma base alargada e organizada para comparação com os resultados da modelação.

As primeiras modelações específicas desses cenários fornecerão resultados que poderão conter disparidades mais facilmente identificáveis e devidas a causas relativamente evidentes, e outras de maior dificuldade de identificação. A correcção do primeiro tipo de discrepâncias é a chamada macro-calibração, que decorre iterativamente, com ajustamentos, simulações e comparações sucessivas, até as diferenças mais óbvias serem eliminadas.

Durante e após essa correcção, uma análise de sensibilidade sistemática permitirá estabelecer relações causa-efeito entre os

parâmetros de calibração e a natureza e escala das diferenças entre os resultados do modelo e as medições de rede. Nesta fase, procurar-se-á entender qual a sensibilidade do modelo – e do sistema – a mudanças nos coeficientes de perda de carga, ou na escala e/ou distribuição espacial dos consumos.

A análise de sensibilidade deverá ser efectuada por forma a evitar que erros de natureza diferente se possam anular mutuamente, mascarando o seu efeito no resultado final. É importante que os parâmetros sejam alterados um a um e de forma independente, e que sejam estabelecidas correlações de forma rigorosa. A partir dessa análise, proceder-se-á então à micro-calibração, que consiste no ajuste mais fino dos parâmetros do modelo na procura da melhor concordância possível, dentro das restrições temporais ou de recursos disponíveis, para cumprir o grau de precisão desejado.

Este processo de tentativa-e-erro requer que o analista vá fornecendo ao modelo estimativas das principais variáveis de decisão – factores de rugosidade das condutas e consumos nos nós (tendo em conta o que foi referido acima, em 5.2.2) – orientando o sentido das sucessivas simulações, e comparando e avaliando os resultados. No caso de se tornar impossível a concordância de valores, deverão ser desenvolvidas hipóteses explicativas (considerando todas as possíveis causas de erros), testadas no modelo, e o processo repetido a partir daquelas que se revelarem mais prometedoras.

5.4.1 O que medir e onde medir

A recolha de dados de calibração deverá obedecer a um planeamento, no sentido de se determinar que grandezas medir, quando, onde, e sob que condições. Uma vez que a realização de medições de campo envolve sempre encargos logísticos, de equipamento e de mão de obra, podendo ainda obrigar a cortes temporários e outras alterações da rede, existe sempre uma pressão sobre o modelador no sentido de reduzir o número de intervenções a um mínimo. Por outro lado, procurar-se-á que os resultados obtidos sejam o mais úteis possível às acções de calibração.

A questão da melhor localização das medições, sobretudo de pressão, a efectuar para efeitos de calibração de modelos de sistemas de abastecimento, é um tema recorrente nos estudos efectuados neste domínio nas últimas duas décadas, e para o qual têm sido propostas variadas abordagens (consultar, entre outros,

Jankovic-Nisic *et al.*, 2004; Lansey *et al.*, 2001; de Schaetzen *et al.*, 1999; AWWA, 1999; Walski, 1995 e 1983; Lee e Deininger, 1992; Alegre, 1991).

O método mais clássico consiste em localizar os medidores de pressão na vizinhança de zonas de concentração de consumos, e nas zonas periféricas da rede, longe dos pontos de abastecimento, para maximizar a sensibilidade das perdas de carga aos caudais. Os testes de perda de carga ou de caudal de incêndio deverão ser realizados com os maiores caudais de descarga praticáveis.

Muitas das abordagens mais recentes procuram resolver iterativamente o problema intrinsecamente indefinido que consiste em escolher a melhor combinação de localizações de medição para a calibração, o que só poderá ser garantido se os parâmetros de calibração forem conhecidos. Estes só podem ser conhecidos se o modelo estiver calibrado, o que não pode ser feito sem terem sido escolhidos os pontos de medição. As soluções iterativas são por vezes encapsuladas em algoritmos automatizados de optimização, com funções-objectivo relacionadas com a minimização da incerteza do modelo, com a maximização da cobertura das medições, e/ou com a minimização dos custos implicados pelas medições. Algumas dessas soluções podem ser encontradas no *software* de simulação actualmente disponível no mercado.

Walski *et al.* (2003) referem os seguintes aspectos como potenciais fragilidades dos métodos automatizados ou optimizados:

- muitos factores determinantes para a interpretação dos resultados dos modelos não são passíveis de serem incorporados no processo de optimização;
- os objectivos de localizações permanentes e de localizações pontuais podem diferir grandemente;
- os critérios relativos a parâmetros hidráulicos e a parâmetros necessários para a calibração de modelos qualidade da água podem ser difíceis de conciliar;
- as localizações destinadas a recolha de dados para calibração de simulações em período alargado necessitam de registar um comportamento dinâmico suficientemente revelador do(s) parâmetro(s) em causa, o que se pode tornar quase impossível de garantir.

Estas razões, entre outras, aconselham a que a utilização de calibradores automáticos ou optimizados seja feita com uma

intervenção passo a passo do modelador, empregando razoabilidade e capacidade crítica para avaliar o processo iterativo e procurando comparar sempre os resultados obtidos com a forma como o processo seria conduzido se efectuado manualmente.

5.4.2 Como comparar e o que ajustar

O conceito fundamental que deve orientar a procura de cenários de comparação é o seguinte: o modelo deve ser utilizado para inferência em situação de interpolação, não em extrapolação. Ou seja, como princípio geral, deverá ser calibrado utilizando conjuntos de valores que delimitem, acima e abaixo, a gama de valores dos cenários a simular.

É essencialmente por esta razão que, como se verá adiante, se pode afirmar que o modelo de um sistema sobredimensionado – em que as velocidades são baixas e, consequentemente, as perdas de carga pouco significativas – é *mais fácil de calibrar*.

A comparação dos resultados do modelo com os dados obtidos em medições de campo deverá ser orientada para objectivos específicos. É muito improvável, por exemplo, que os valores de pressão modelados e os valores medidos no sistema coincidam em todos os pontos do sistema e para todos os momentos da modelação. A resposta de um sistema e do respectivo modelo às diferentes condições de caudal impostas poderá variar grandemente. Walski *et al.* (2003) sugerem os seguintes princípios gerais:

- Sistemas com baixas velocidades de escoamento

  Muitos sistemas encontram-se sobredimensionados para a maioria das condições de consumo em que operam, como consequência da imposição de diâmetros mínimos, e/ou pelo facto de terem sido dimensionados para caudais de ponta no horizonte de projecto, que acabam por não ocorrer com frequência, possivelmente ainda agravados pela verificação das condições de combate a incêndio. O resultado é a ocorrência generalizada de velocidades de escoamento baixas, o que provoca perdas de carga reduzidas. A calibração para condições de consumo e operação médios não será consequentemente muito reveladora, uma vez que a própria rede não será muito sensível a alterações nos coeficientes de rugosidade ou mesmo à distribuição nodal de consumos. A informação obtida poderá ser útil sobretudo para verificação de conectividade da rede, das condições de fronteira nos reservatórios e pontos de abastecimento à rede, e da altimetria

– cotas do terreno incorrectas são mais facilmente identificadas na superfície piezométrica quando as perdas de carga são baixas.

Se o objectivo da simulação for apenas a análise hidráulica, e para condições de consumo e operação não muito diferentes das que se verificam na realidade, o modelo será provavelmente credível mesmo que não seja possível adquirir dados sobre caudais e pressões – i.e., os resultados do modelo provavelmente acompanharão a realidade com bastante aproximação[25]. Os valores reais de rugosidade da condutas e demais condições de perda de carga serão sempre uma incógnita, mas serão praticamente irrelevantes para a análise hidráulica neste caso, pois não influem nos resultados. O mesmo poderia verificar-se relativamente à incógnita representada pela distribuição espacial de consumo.

No entanto, se o objectivo da análise passar pela simulação de parâmetros de qualidade da água, já é fundamental ter alguma confiança na distribuição espacial de consumos utilizada, pois influenciará directamente os tempos de percurso.

Por outras palavras, em sistemas sobredimensionados, e para análise apenas hidráulica de cenários correntes, não se justifica a calibração sistemática dos valores de rugosidade (e os necessários testes de perda de carga); se a análise envolver a simulação de parâmetros de qualidade da água, é sobretudo a distribuição de consumos que estará em causa.

- Sistemas com altas velocidades de escoamento

  Para sistemas que operem próximo da sua capacidade de transporte, e consequentemente com velocidades de escoamento mais altas, a consideração de cenários médios já trará uma sensibilidade significativa das pressões tanto aos coeficientes de rugosidade como aos consumos nos nós. O mesmo se passará, nos sistemas sobredimensionados acima referidos, se forem testadas condições excepcionais de consumo, se possível sobrepostas a caudais de incêndio (no entanto, não é fácil obter medições de campo correspondentes

---

[25] Note-se que tal já não seria necessariamente verdade se, por exemplo, fosse pretendida uma análise projectada no futuro, para consumos muito superiores aos que se verificam no presente.

a estas situações, justamente por serem pouco frequentes ou difíceis de provocar intencionalmente).

Por outras palavras, os coeficientes de rugosidade e/ou os consumos nos nós deverão ser calibrados utilizando cenários de perda de carga elevada, onde se tornam mais evidentes os efeitos dos ajustes no resultado final. A perda de carga é superior para caudais superiores e/ou para rugosidades mais elevadas. As seguintes observações poderão ter lugar:

- Nos casos em que a cota piezométrica modelada é maior do que o valor medido na rede, deverá ser reduzido o valor do coeficiente de rugosidade ou reduzido o consumo nos nós afectados. Os dois efeitos só deverão ser testados em simultâneo depois de ser identificada a sensibilidade do sistema a cada um, isoladamente.
- Se, pelo contrário, a cota piezométrica modelada resulta inferior às medições de rede, deverão ser aumentados os valores do coeficiente de rugosidade ou reforçados os consumos na zona afectada.

Nas primeiras iterações, o ajustamento do coeficiente de rugosidade deverá ser coerente através da rede, ou seja, dever-se-á alterar da mesma forma todas as condutas do mesmo material e idade daquelas que são objecto da comparação directa. Já as alterações na distribuição espacial de consumos podem reflectir efeitos mais localizados, sem colocar no entanto em causa o equilíbrio total da rede (para qualquer que seja o instante da simulação, a soma dos consumos nos nós terá sempre de ser igual ao caudal total consumido).

Outro aspecto que não deve ser esquecido prende-se com a necessidade frequente de (na expressão utilizada por alguns especialistas) *calibrar o sistema*. É frequente, durante a calibração, observarem-se diferenças que levam a agir sobre o próprio sistema para corrigir a sua configuração: por exemplo, uma válvula que deveria estar fechada e que afinal estava inopinadamente aberta. Tal constitui sintoma de que a calibração é parte integrante do processo de ganho de conhecimento sobre o sistema que constitui a modelação.

5.4.3 Simulação em período alargado

A calibração de um modelo em período alargado não tem necessariamente de ser realizada para cenários em período alargado. Pelo contrário, tal como no caso dos modelos estáticos, pode e deve ser realizada para cenários específicos (consumos

médios e consumos máximos), evitando introduzir um maior número de graus de liberdade pela utilização da variável tempo, sem ganho efectivo.

Na realidade, o equilíbrio hidráulico dá-se instantaneamente, pelo que não parece credível que a representação em período alargado das condições de calibração e respectivas medições corresponda a mais do que apenas uma forma confortável de exprimir os resultados.

As situações em que é efectivamente necessário introduzir a componente *tempo* – e portanto calibrar um modelo em período alargado com medições efectuadas ao longo do tempo, de forma específica – prende-se com a necessidade de afinar grandezas cujo cálculo dependa da integração temporal de valores do modelo. Estão nessa categoria os volumes em reservatórios de nível variável (RNV), o tempo de percurso, o rastreio de origens de água e as concentrações de parâmetros de qualidade da água. A calibração destes parâmetros coloca particulares exigências numa eficaz distribuição espacial de consumos, e em diagramas de consumo correctamente especificados.

A calibração de modelos para cenários de simulação em período alargado coloca naturalmente maiores desafios do que a calibração de cenários estáticos, pela natureza dinâmica das grandezas envolvidas. Na realidade, deverá sempre partir de uma calibração correcta, para um ou mais cenários estáticos, da altimetria, da distribuição espacial de consumos e dos coeficientes de rugosidade. A calibração para SPA verificará sobretudo os aspectos relativos à variação temporal dos consumos, às condições de fronteira e aos níveis nos reservatórios.

A calibração para SPA deverá ser executada utilizando as medições de caudal à entrada dos sectores de rede como padrão de consumo, com a distribuição espacial de consumo em formato adimensional (totalizando a unidade), tal como descrito em 4.4.3. Dessa forma, o modelo deverá pelo menos totalizar correctamente o caudal consumido na rede, em cada instante.

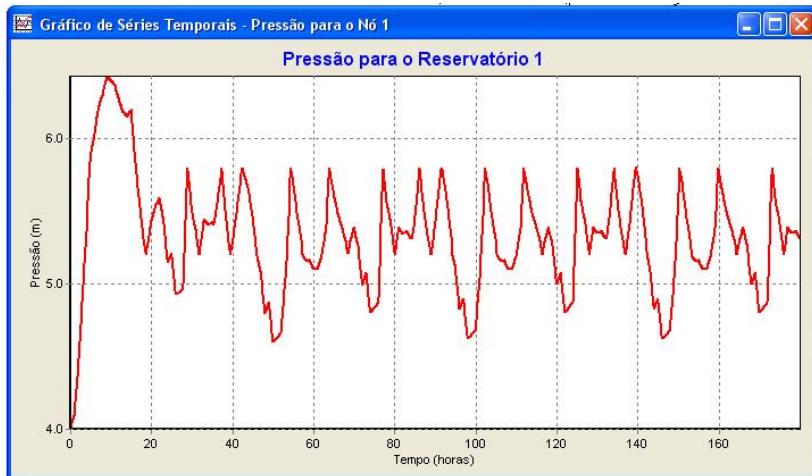



Figura 5.7 – Estabilização das variações de nível de um reservatório (regime cíclico estável, com um passo temporal de 48 horas; simulação em período alargado com a duração de 180 horas).

Por outro lado, para a eficaz calibração para SPA, é fundamental que o modelo corra para durações superiores àquelas que serão necessárias para que as variações do parâmetro em causa (p.ex., o nível em determinado RNV) entrem num regime cíclico estável (Figura 5.7).

A comparação de gráficos temporais dos níveis calculados e medidos nos reservatórios (Figura 5.8a) constitui um mecanismo comum de calibração hidráulica para SPA.

De uma forma geral, se os dois gráficos têm andamentos semelhantes, com diferenças apenas na escala, haverá provavelmente ajustes a realizar à escala e à variação temporal dos consumos na zona de rede afectada. As discrepâncias no balanço volumétrico do reservatório, por período do dia, poderão fornecer indicações sobre os ajustes a efectuar ao consumos nodais e/ou aos padrões de consumo do sector.

Se as duas linhas têm traçados discordantes, haverá possivelmente erros na especificação de condições de bombeamento para o reservatório ou no regime de controlo das válvulas envolvidas na manobra do conjunto.

(a)

(b)

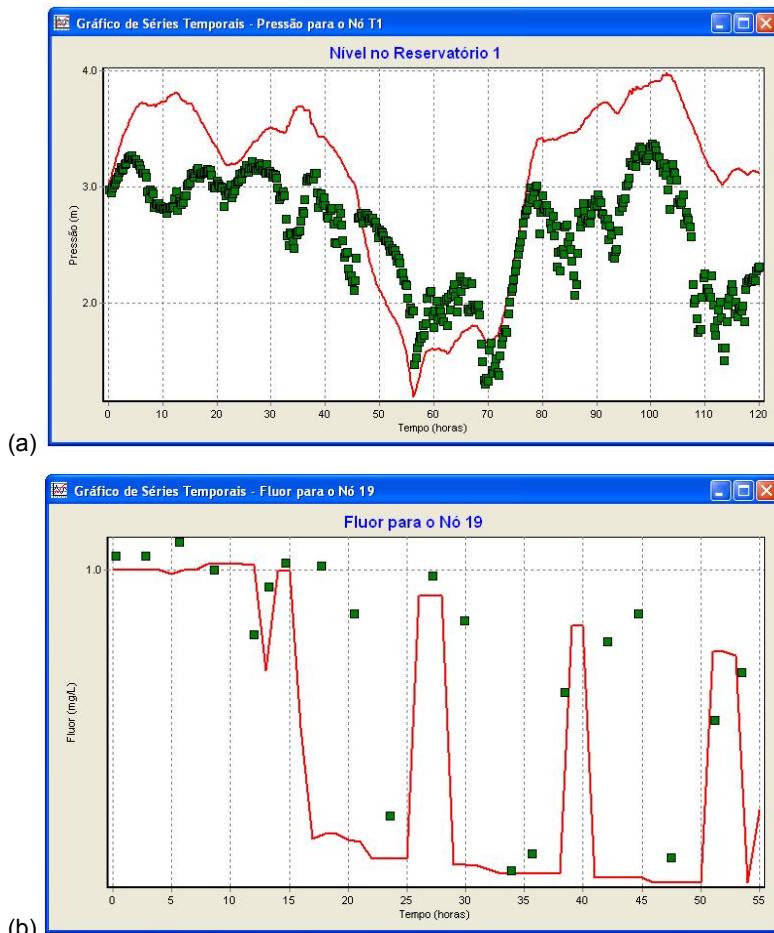



Figura 5.8 – Comparação de gráficos temporais de (a) nível e de (b) traçador.

Uma outra forma de comparar a resposta de um modelo com os resultados de campo, para SPA, consiste na utilização de traçadores.

Um traçador – uma substância inócua para a saúde pública, fácil de monotorizar e indetectável pelo consumidor, como p.ex., o flúor – com características conservativas (i.e., que não reage ou se transforma noutra substância durante o seu percurso no sistema), é injectado no sistema de acordo com um padrão conhecido, que inclui alguns picos pré-estabelecidos, e a sua concentração verificada ao longo do sistema.

Como foi observado no Cap. 2, o movimento e mistura de substâncias em solução na água depende exclusivamente da hidráulica do sistema, ou seja, das velocidades nos troços e do balanço de caudais nos nós. O seguimento de traçadores e a comparação dos valores medidos com os resultantes do modelo (simulando a concentração da mesma substância, com o mesmo padrão de injecção) pode revelar discrepâncias tanto de escala como de *timing* dos picos de concentração injectados (Figura 5.8b).

No primeiro caso, tal revelará um desequilíbrio dos volumes de água que circulam naquela zona da rede, e a necessidade de ajuste da distribuição espacial de consumos da rede. No segundo caso, o atraso ou adiantamento dos picos de concentração revela discrepâncias nos valores da velocidade de escoamento, e consequentemente, do caudal, o que implica a necessidade de ajuste da escala dos consumos na zona abastecida.

Embora a utilização de traçadores seja relativamente comum nos EUA, Canadá ou em certos países europeus, não existe tradição desta prática em Portugal. A adição de compostos á água é um assunto sensível para a maioria das entidades gestoras, pelo que nem sempre esta solução será exequível.

No entanto, há em muitos casos a possibilidade de utilizar, para o efeito, compostos que já sejam adicionados à água, de monitorização rotineira, e que embora não sendo conservativos, revelem um decaimento suficientemente lento. O cloro residual pode servir este propósito, em sistemas em que, pelas características da água e das condutas, e para tempos de percurso não muito elevados, o decaimento seja pouco pronunciado.

A Figura 5.9 exemplifica a utilização de cloro residual como traçador para calibração do modelo de um sistema onde o decaimento é pouco significativo. Embora não seja possível concluir sobre a diferença de escala vertical entre as duas curvas, pois pode ficar a dever-se a um efeito de decaimento mal modelado, o atraso nos pontos de inflexão da curva dos valores modelados relativamente aos valores medidos na rede corresponde ao atraso acumulado pelo modelo, no percurso entre o ponto de cloragem e o ponto onde é feita a comparação.

Esse atraso deve-se a velocidades de escoamento sub-avaliadas, e portanto a caudais mais baixos do que a realidade, o que significa que os consumos na zona abastecida deverão ser

incrementados (com o correspondente decréscimo dos consumos noutras zonas, por forma a manter o equilíbrio global).

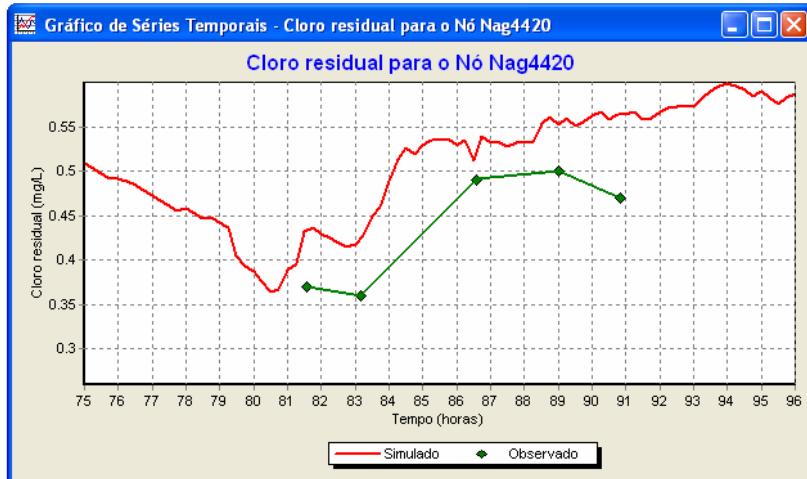



Figura 5.9 – Utilização de cloro residual como traçador num sistema onde o seu decaimento é pouco pronunciado.

5.4.4 Modelos de sistemas de adução

Os sistemas de adução, que transportam a água desde a produção até aos reservatórios para distribuição, possuem características muito próprias que condicionam o seu comportamento hidráulico e, consequentemente, a sua modelação.

Estes sistemas caracterizam-se por:

- topologias relativamente simplificadas, muitas vezes totalmente ramificadas;
- condutas de médio e grande diâmetro;
- poucos pontos de consumo, habitualmente bem caracterizados – é frequente o registo individual de caudais de entrega – e muitas vezes condicionados por reservatórios de entrega que estabelece condições de fronteira precisas;
- operação frequentemente muito mais complexa do que os sistemas de distribuição comuns, em virtude da interdependência de reservatórios e condutas elevatórias em série.

Na calibração de modelos deste tipo de sistemas, os valores da rugosidade interna das condutas não assumem a mesma

preponderância do que nos sistemas de distribuição. Por um lado, a informação sobre o diâmetro, material e estado das condutas é frequentemente de melhor qualidade. Por outro lado, a perda de carga em cada conduta é mais directamente verificável, pela ausência de malhas e pela frequência espacial de pontos de aferição proporcionados pelos sucessivos reservatórios e estações elevatórias.

Também os consumos são mais facilmente caracterizáveis, sendo os sistemas sobretudo condicionados pelas condições de fronteira representadas pelos níveis dos reservatórios de entrega, também estes conhecidos.

A exactidão deste tipo de modelos depende sobretudo da qualidade da descrição das configurações e condições de operação, representadas pela altimetria e níveis máximos e mínimos de reservatórios, alturas e caudais de elevação e regulação de válvulas de operação (sobretudo as válvulas reguladoras de caudal e as válvulas reguladoras de pressão). Assim, a calibração é sobretudo dependente de uma cuidadosa verificação das condições operacionais, envolvendo activamente os operadores do sistema no trabalho de desenvolvimento do modelo e comparação dos resultados. Dada a complexidade destes sistemas, a capacidade de interpretação e sensibilidade dos operadores é essencial para entender e ajustar o modelo. Por outro lado, quando maior o envolvimento dos operadores nesta fase, maior a aceitabilidade do modelo desenvolvido na futura utilização em ambiente de operação.

5.5 Critérios de calibração

A necessidade de definição caso-a-caso, e em função da utilização que é pretendida para o modelo, do grau de exactidão que constitui o objectivo de determinado esforço de calibração não invalida o estabelecimento de critérios de qualidade gerais. Tais critérios devem ser entendidos sobretudo como um ponto de comparação, uma ordem de grandeza daquilo que poderá ser esperado no correcto desenvolvimento de modelos. Deve, no entanto, manter-se sempre presente o princípio-base de que o esforço de calibração correcto é essencialmente uma função dos objectivos da análise.

A tolerância a admitir para a diferença entre os valores modelados e os valores medidos de qualquer grandeza não poderá ser inferior à precisão de medição do aparelho com o qual foi

efectuada a medição. Este aspecto é particularmente importante na calibração de modelos de qualidade da água, uma vez que o limite de detecção dos equipamentos utilizados para a medição de concentrações é muitas vezes pouco evidente para o utilizador menos especializado.

No Reino Unido, o Water Research Centre publicou critérios normalizados (WRc, 1989). Reproduzem-se seguidamente os principais requisitos relativos à calibração de pressões e de caudais:

- Critérios relativos aos valores de pressão
  - 85% dos valores medidos na rede deverão satisfazer a maior das duas tolerâncias: ± 0.50 m ou ± 5% da maior perda de carga verificada na rede.
  - 95% dos valores medidos na rede deverão satisfazer a maior das duas tolerâncias: ± 0.75 m ou ± 7.5% da maior perda de carga verificada na rede.
  - 100% dos valores medidos na rede deverão satisfazer a maior das duas tolerâncias: ± 2.0 m ou ± 15% da maior perda de carga verificada na rede.
- Critérios relativos aos valores de caudal
  - Em condutas onde o caudal seja medido, e superior a 10% do consumo total da rede, o caudal modelado deverá igualar o caudal medido com uma tolerância de ± 5%.
  - Em condutas onde o caudal seja medido, e inferior a 10% do consumo total da rede, o caudal modelado deverá igualar o caudal medido com uma tolerância de ± 10%.

Walski *et al.* (2003) sistematizam um conjunto bastante abrangente de critérios quantitativos, em função das utilizações previstas para os modelos. Não deixam todavia de observar que os números fornecidos devem sempre ser tomados como guias, em função dos condicionalismos locais e dos objectivos pretendidos para a análise. Quando a tolerância é dada em termos de uma gama de valores, o limite superior será geralmente atribuível a sistemas maiores ou mais complexos, e o limite inferior a sistemas menores ou mais simples. A lista, que se reproduz abaixo, está organizada por objectivos de modelação:

- Elaboração de Planos Directores para sistemas de pequena e média dimensão (sem diâmetros superiores a 600 mm)
  - O modelo deverá fornecer valores da cota piezométrica com uma tolerância inferior a ± 1.5-3.0 m (dependendo da dimensão do sistema) para os testes de caudal de incêndio nos pontos de calibração, tomando em consideração a precisão das medições da

cota do terreno e da pressão para consumos médios. O modelo deverá reproduzir as flutuações de nível nos reservatórios com uma tolerância inferior a ± 1.0-2.0 m, em SPA, e simular os caudais à saída de estações de tratamento, instalações elevatórias e captações, com uma tolerância inferior a ± 10-20%.

- Elaboração de Planos Directores para sistemas de grande dimensão (com diâmetros superiores a 600 mm)
  - O modelo deverá fornecer valores da cota piezométrica com uma tolerância inferior a ± 1.5-3.0 m durante os períodos de velocidades / caudais máximos, tomando em consideração a precisão das medições da cota do terreno e da pressão para consumos médios. O modelo deverá reproduzir as flutuações de nível nos reservatórios com uma tolerância inferior a ± 1.0-2.0 m, em SPA, e simular os caudais à saída de estações de tratamento, instalações elevatórias e captações, com uma tolerância inferior a ± 10-20%.
- Dimensionamento de condutas
  - O modelo deverá fornecer valores da cota piezométrica com uma tolerância inferior a ± 1.5-3.0 m, para caudais de incêndio, em pontos de extremidade da conduta em análise, tomando em consideração a precisão das medições da cota do terreno para consumos médios. Se a nova conduta influenciar a operação de um reservatório, o modelo deverá reproduzir as flutuações de nível nos reservatórios com uma tolerância inferior a ± 1.0-2.0 m.
- Análise de caudais de incêndio
  - O modelo deverá fornecer valores da cota piezométrica estática e residual (não-estática) com uma tolerância inferior a ± 1.5-3.0 m, para caudais de incêndio, em pontos representativos de cada zona de pressão, tomando em consideração a precisão das medições da cota do terreno para consumos médios. Se o caudal de incêndio influenciar a operação de um reservatório, o modelo deverá reproduzir as flutuações de nível nos reservatórios com uma tolerância inferior a ± 1.0-2.0 m.
- Sectorização da rede (projecto de zonas de medição e controlo)
  - O modelo deverá fornecer valores da cota piezométrica com uma tolerância inferior a ± 1.5-3.0 m, para os testes de caudal de incêndio, nos pontos de sectorização, tomando em consideração a precisão das medições da cota do terreno para consumos médios.
- Sistemas de abastecimento em zonas rurais (sem provisão para caudais de incêndio)
  - O modelo deverá fornecer valores da cota piezométrica com uma tolerância inferior a ± 3.0-6.0 m, para condições de consumo máximo, em pontos de extremidade do sistema, tomando em consideração a precisão das medições da cota do terreno para consumos médios.

- Análise da reabilitação de sistemas de distribuição
  - O modelo deverá fornecer valores da cota piezométrica estática e residual, na área em estudo, com uma tolerância inferior a ± 1.5-3.0 m, para os testes de caudal de incêndio, tomando em consideração a precisão das medições da cota do terreno para consumos médios.
- Análise do consumo energético
  - O modelo deverá reproduzir o consumo diário de energia com uma tolerância inferior a 5-10 %, o consumo horário de energia com uma tolerância inferior a 10-20 % e o consumo instantâneo de energia com uma tolerância inferior a 5-10 %.
- Planeamento de emergências
  - O modelo deverá fornecer valores da cota piezométrica com uma tolerância inferior a ± 3.0-6.0 m, para situações de emergência (p.ex., incêndio, interrupção na produção de energia eléctrica ou colocação de uma conduta fora de serviço).
- Modelação de um desinfectante residual (p.ex., cloro)
  - O modelo deverá reproduzir o padrão de concentrações do desinfectante residual observado, ao longo do tempo de amostragem, com um erro médio aproximado não superior a 0.1-0.2 mg/l, dependendo da complexidade do sistema.

PARTE III – Aplicações da modelação

6 UTILIZAÇÃO DE MODELOS

6.1 Análise hidráulica

6.1.1 Introdução: ganho de sensibilidade ao funcionamento de um sistema

A utilização mais imediata de um modelo, aquela que decorre mais espontaneamente do processo de desenvolvimento, é o aprofundamento do conhecimento sobre o funcionamento do sistema modelado – por outras palavras, o ganho de sensibilidade ao seu comportamento.

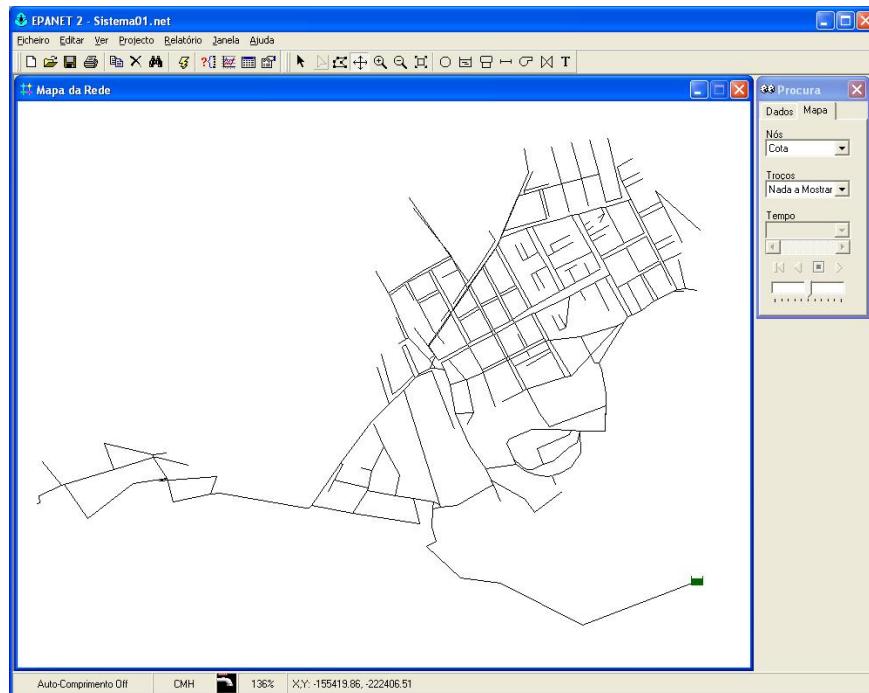



Figura 6.1 – Mapa de rede.

Um modelo, mesmo que não calibrado, reúne num único suporte uma diversidade de informação coligida justamente com o propósito de entender o sistema, e que dificilmente seria compilada noutro contexto: descrição física, descrição dos consumos e sua variação temporal, discriminação detalhada dos controlos e regras de operação. O primeiro ganho é a *simples* motivação para tal compilação, cuja utilidade não deve ser desprezada.

A primeira impressão, aquando da análise de um sistema através do seu modelo, decorre da verificação das suas características físicas: topologia (o mapa da rede), diâmetros, materiais e comprimentos das condutas, e altimetria dos respectivos pontos notáveis (nós). O exercício aqui proposto, no sentido de ilustrar o processo de ganho de sensibilidade, é o de *descobrir* um sistema real através do seu modelo[26].

A Figura 6.1 representa o respectivo mapa de rede, em que apenas é perceptível a topologia. Sabe-se que se trata de um sistema que abastece uma zona urbana, onde predominam edifícios com 3 pisos de altura, cem cerca de 25 km de condutas (dos quais 21.4 km em fibrocimento e 3.6 km em PVC, sendo este material concentrado no sector que fica mais à esquerda no mapa), com diâmetros entre 50 mm e 310 mm.

A rede é abastecida graviticamente a partir do reservatório situado no canto inferior direito do mapa. Sobrepondo isolinhas de cota topográfica, visíveis na Figura 6.2, é possível observar um terreno com um declive bastante suave, sendo a diferença de cotas entre a elevação onde está o reservatório e as zonas extremas da rede relativamente diminuta.

Para se ter uma ideia da estrutura da rede, uma das ferramentas mais úteis consiste em representar as condutas com uma largura de traço proporcional ao diâmetro, tal como na Figura 6.3 (foi ainda utilizada uma codificação de cores).

As categorias utilizadas na legenda (canto superior esquerdo) foram escolhidas para separar os principais diâmetros utilizados, que são conhecidos, visto se cingirem às gamas comercialmente disponíveis. Tal como outros simuladores, o Epanet 2.0 permite ainda definir categorias com base em quantis da população de valores da variável pretendida, ou ainda com base em intervalos iguais, desde o valor mínimo ao valor máximo presentes. Essas possibilidades são útil quando não existem *a priori* valores de referência, como se verá adiante.

---

[26] O exemplo baseia-se num sistema existente.

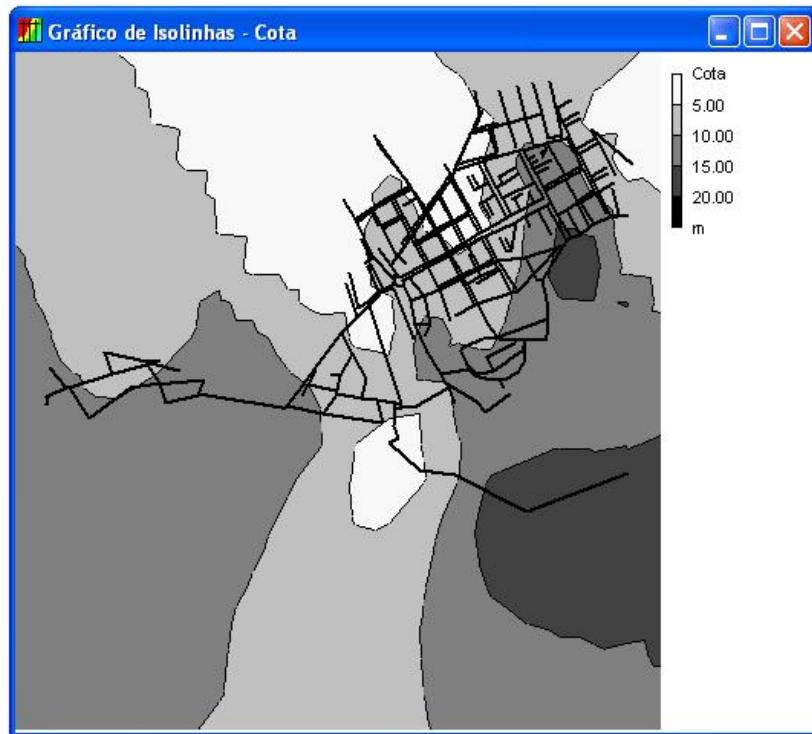



Figura 6.2 – Mapa de isolinhas de cota topográfica.

A representação dos diâmetros permite identificar uma estrutura-base do sistema, frequentemente chamado o *esqueleto* da rede. Uma rede bem desenhada e bem dimensionada tenderá a ter um esqueleto coincidente com os principais caudais a transportar, e ao longo dos caminhos de menor perda de carga. No entanto, os sistemas construídos por forma a acompanhar uma expansão urbana nem sempre muito planeada tendem a revelar maiores assimetrias nesse aspecto.

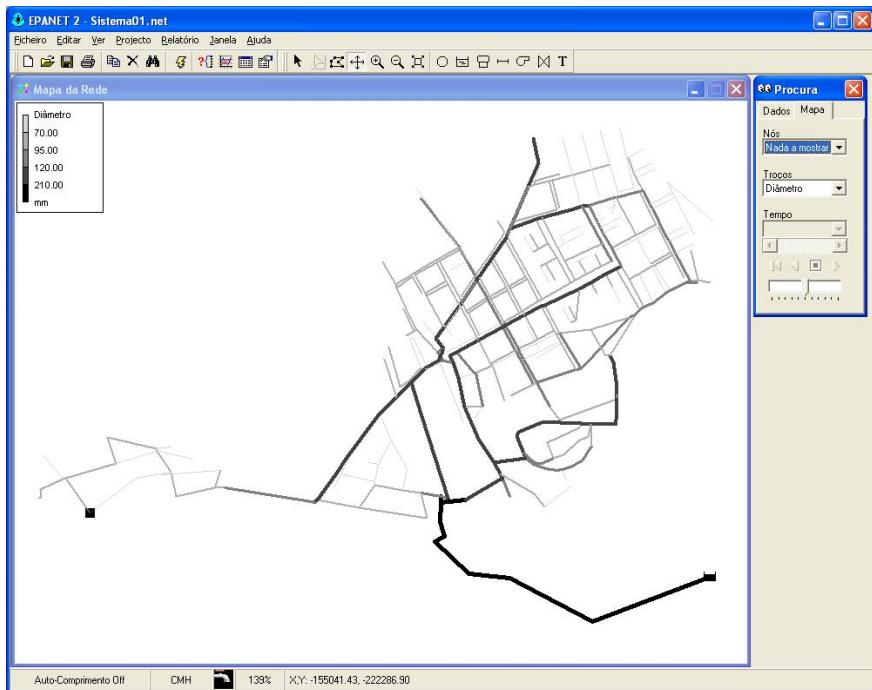



Figura 6.3 – Representação dos diâmetros de conduta, através de traço proporcional ao valor e codificação de cores.

Tendo já obtido a informação passível de ser deduzida de uma análise da infra-estrutura física apenas, pode passar-se a executar simulações que permitam ir progressivamente analisando os valores das principais variáveis de estado, e assim ir ganhando sensibilidade ao comportamento da rede.

O modelo foi desenvolvido para simulação em período alargado, com um único padrão de consumo, por este ser relativamente homogéneo em toda a rede (Figura 6.5).

O consumo máximo dá-se às 11:00 do padrão. Executada a simulação, e começando-se por uma análise de valores do caudal, será natural ir-se investigar os caudais máximos. A Figura 6.4 representa os caudais, à hora de maior consumo, da mesma forma que os diâmetros anteriormente representados: através de traço proporcional ao valor e codificação de cores. Neste caso, no entanto, as categorias estão definidas por quantis da população de valores da variável caudal em toda a rede, uma vez que *a priori* não haveria valores de referência. Desta forma, garante-se que é dado

maior realce aos troços transportando efectivamente os caudais mais importantes.

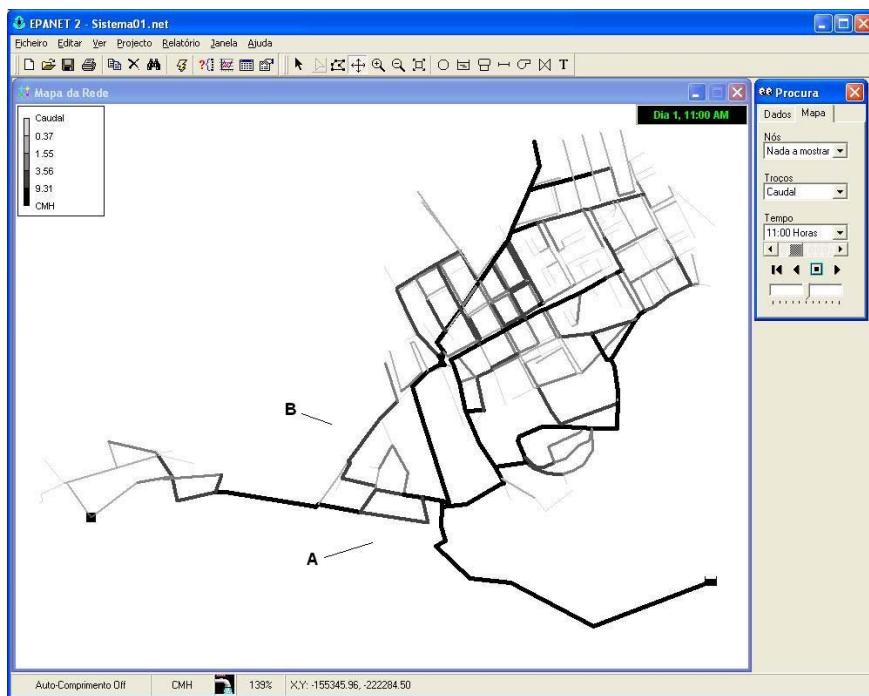



Figura 6.4 – Representação do caudal nas condutas, através de traço proporcional ao valor e codificação de cores; categorias definidas por quantis.

A outra hipótese, de representação por intervalos iguais, poderia neste caso ser enviesada pela presença de caudais muito baixos (nos extremos de rede) e/ou muito altos (na conduta de abastecimento principal).

Comparando o esqueleto de diâmetros com a disposição dos principais caudais, verifica-se que existe alguma sobreposição natural. No entanto, pode imediatamente verificar-se que a alimentação para o sector do lado esquerdo é apenas efectuada pelo braço inferior (A, na Figura 6.4), de menor diâmetro, uma vez que o braço superior (B, na Figura 6.4), de maior diâmetro, não está ligado. Tal indicia um potencial estrangulamento no abastecimento àquele sector, sabendo-se de antemão que a diferença de cotas não é muito grande e portanto a carga disponível é igualmente pequena.

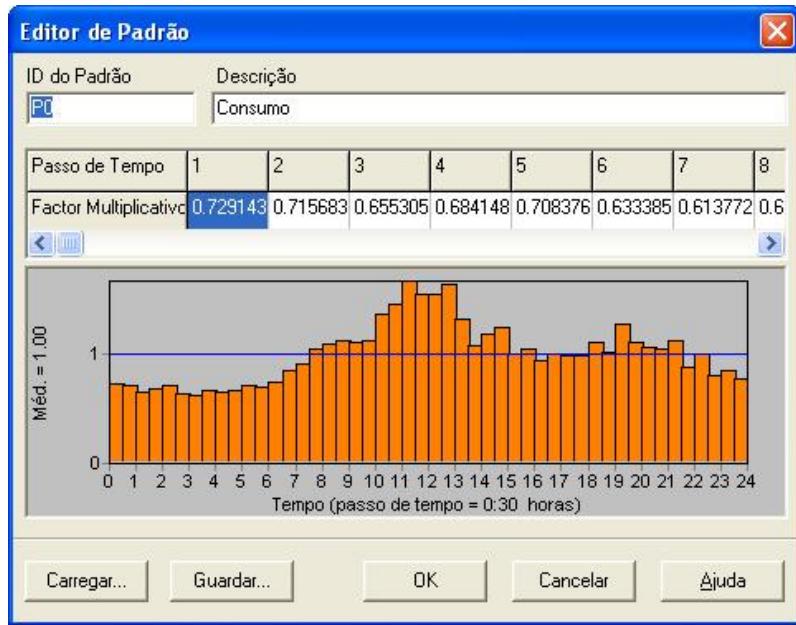



Figura 6.5 – Padrão de consumo residencial, utilizado em toda a rede.

A variável que interessará analisar seguidamente é a perda de carga unitária, para procurar conhecer a sua importância no funcionamento do sistema; por outras palavras, se se trata de um sistema com grandes perdas de carga – com estrangulamentos limitativos da sua expansão ou mesmo da operação corrente – ou se pelo contrário tem ainda margem para crescimento dos consumos. Essa variável fornece ainda uma ideia das exigências em termos de calibração que poderiam apresentar-se ao modelo desenvolvido.

A Figura 6.6 representa a perda de carga unitária, igualmente à hora de maior consumo, tendo-se sido definidas categorias *a priori*, uma vez que podem ser utilizados para referência valores da ordem de grandeza dos valores de projecto.

A perda de carga unitária para a hora de maior consumo confirma alguns estrangulamentos importantes, sobretudo na primeira bifurcação da conduta principal vinda do reservatório, e na conduta que abastece o sector do lado esquerdo, tal como era previsível. Verificam-se ainda outros estrangulamentos pontuais que poderão ou não representar um problema em função das condições operacionais. Nesse sentido, é importante analisar os valores da

pressão disponível nos nós de consumo. Tratando-se de um sistema com capacidade limitada, mais uma vez será importante sobretudo atender às pressões mínimas, que se verificarão à hora de maior consumo (Figura 6.7).

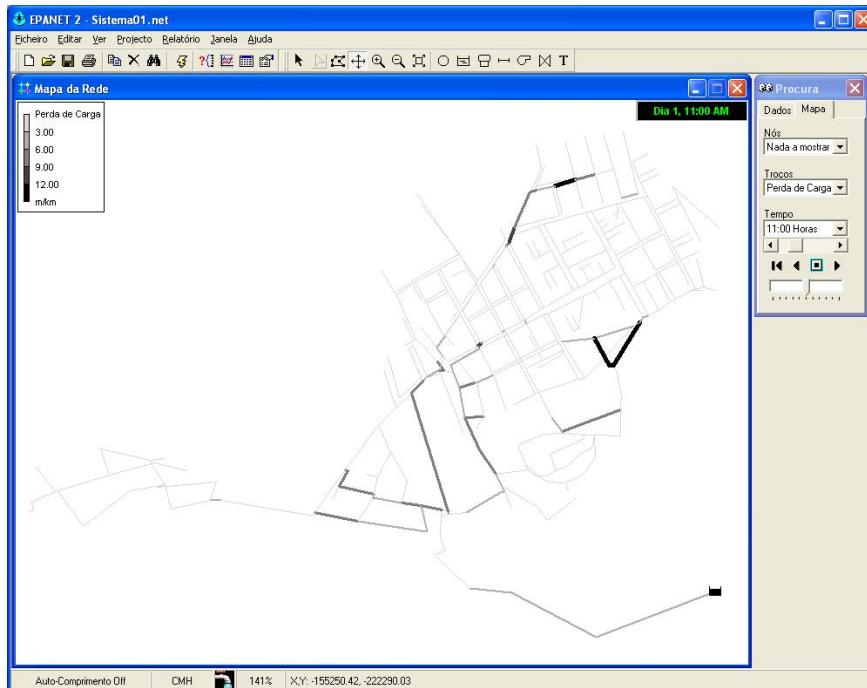



Figura 6.6 – Representação da perda de carga unitária nas condutas, através de traço proporcional ao valor e codificação de cores; categorias definidas *a priori*.

Os nós com menor pressão disponível estão representados a tonalidades mais escuras. Tal como se previa, existem nós com pressões mínimas bastantes baixas, confirmando a ideia de se tratar de um sistema com a capacidade hidráulica perto do limite em algumas condutas condicionantes, que apresentam perdas de carga significativas.

Dada a limitação de cotas, para aumentar a capacidade da rede sem alterar o tipo de abastecimento e a posição do reservatório, seria necessário reforçar as condutas de maior perda de carga. A rede tem alguns estrangulamentos de origem topológica que poderiam ser minimizados com a ligação, por exemplo, da conduta identificada como B na Figura 6.4.

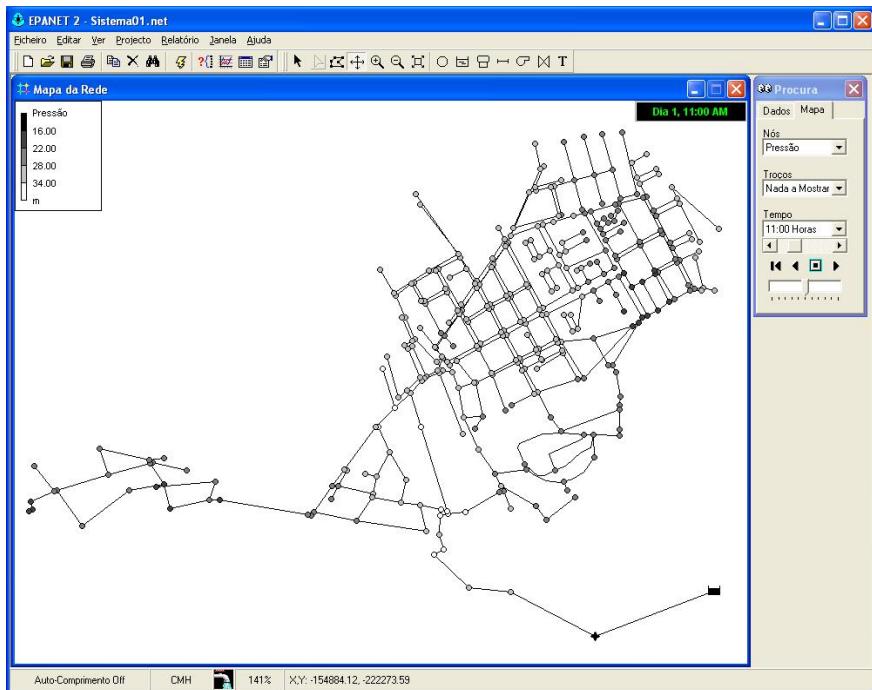



Figura 6.7 – Representação da pressão nos nós; categorias definidas *a priori.*

A análise realizada não pretende ser exaustiva, antes ilustrar de forma simples uma abordagem típica à utilização de um modelo para compreender o funcionamento de um sistema. Optou-se pela representação essencialmente gráfica, pela sua expressividade, e focou-se o cuidado a ter na expressão dos parâmetros envolvidos. Nada obsta, naturalmente, a que seja complementada com a representação numérica (no mapa) e tabular dos resultados.

6.1.2 Análise do funcionamento de reservatórios e estações elevatórias

6.1.2.1 Aspectos gerais

Uma das contribuições mais decisivas da modelação de sistemas de abastecimento de água é a possibilidade de entender o comportamento de reservatórios no seio do sistema, e o seu impacto tanto para o equilíbrio hidráulico deste como para a qualidade da água distribuída.

Da mesma forma, os modelos de simulação permitem reproduzir o comportamento de instalações elevatórias, com regras de operação menos ou mais complexas, dependentes de controlos temporais ou relacionadas com níveis em reservatórios ou com os valores da altura piezométrica em determinados pontos da rede.

A associação de instalações elevatórias e reservatórios é frequente nos sistemas de abastecimento – particularmente nos sistemas de transporte ou adução – e origina por vezes comportamentos de maior complexidade do que aquela que é aparente. São justamente o processo do desenvolvimento de um modelo e a tentativa de descrever o fenómeno que permitem uma percepção mais evidente da complexidade do comportamento do sistema.

6.1.2.2 Processos de cálculo hidráulico dependentes do tempo

Como já foi referido anteriormente, o equilíbrio hidráulico de uma rede de condutas em pressão dá-se de forma quasi-instantânea. Por essa razão, é relativamente seguro tratar a simulação em período alargado como uma sequência de fotografias instantâneas: assim que as solicitações ao sistema – os consumos – mudam para um novo conjunto de valores, o equilíbrio hidráulico pode ser recalculado e, à escala temporal a que o fenómeno é tratado nos modelos de simulação, é instantâneo e praticamente independente das condições hidráulicas representadas pelo instante anterior. Por outras palavras, desse ponto de vista, o equilíbrio hidráulico não possui "memória", entre dois instantes consecutivos da simulação.

Tal consideração é válida, à excepção de 2 tipos de fenómenos que correspondem a condições de fronteira hidráulicas dependentes do tempo[27]:

- a variação de volume armazenado em corpos de água de volume limitado, como os RNV – reservatórios de nível variável;

---

[27] Note-se que tais considerações são válidas para o cálculo do equilíbrio hidráulico, expresso pelas variáveis fundamentais: caudal (velocidade) e altura piezométrica. Quando se pretende estender esse calculo a variáveis que dependem da integração de valores da velocidade de escoamento relativamente ao tempo, como o transporte, mistura e transformação da concentração de um determinado parâmetro de qualidade da água, então o fenómeno é intrinsecamente dependente do tempo de forma contínua. Este aspecto é tratado posteriormente, a propósito da simulação de qualidade da água.

- o accionamento de certos órgãos hidráulicos – como as bombas e as válvulas – de acordo com regras de controlo hidráulico dependentes do tempo.

O tratamento destes dois fenómenos obriga assim a cuidados especiais na simulação, e beneficia efectivamente da utilização da modelação em período alargado, por comparação com a modelação estática. As secções seguintes procuram descrever os principais aspectos a tomar em consideração nestes casos.

6.1.2.3 Reservatórios de nível variável e instalações elevatórias

A existência de um volume de água limitado pelas dimensões de um RNV, e que em cada momento é igual ao volume do momento anterior adicionado do balanço entre o caudal que entra e o caudal que sai do reservatório – balanço esse que pode ser positivo, nulo ou negativo – complica o cálculo do balanço hídrico na rede influenciada por esse reservatório.

Tal deve-se ao facto de esse volume corresponder a determinada altura de água no reservatório, e portanto a determinada condição de fronteira para a altura piezométrica nesse ponto. Dependente desse valor está toda a superfície piezométrica na vizinhança desse ponto, o que por sua vez condiciona os caudais que circulam, e nomeadamente os caudais que entram e saem do reservatório. Estes, por sua vez, condicionam o volume no reservatório e por consequência a referida condição de fronteira.

O cálculo do comportamento de RNV entre dois momentos sucessivos é assim complexo, sendo resolvido pelos modelos de simulação através de um processo iterativo numérico. O comportamento dos RNV durante a simulação hidráulica implica alguns cuidados adicionais na verificação dos resultados, mas permite igualmente, em alguma medida, a aferição da qualidade do modelo.

O sistema representado pelo modelo ilustrado na Figura 6.8 é alimentado por duas origens, sendo uma delas utilizada de modo contínuo, a partir de uma captação em rio; a outra origem de água é uma captação num lago, utilizada como reforço apenas durante uma parte do dia. O sistema alimenta uma zona de consumo residencial, e ainda 4 outros sistemas de distribuição periféricos.

A origem de água proveniente do rio tem uma estação elevatória, cujo funcionamento é controlado pelo altura de água no RNV 1 – a bomba entra em operação quando o nível no reservatório desce abaixo de 5.20 m, e fecha quando este atinge 5.80m. A bomba que

eleva a água a partir do lago opera apenas no período compreendido entre a 1 e as 15 horas de cada ciclo diário de simulação. Ambas as instalações elevatórias utilizam bombas de velocidade fixa.

O reservatório RNV 1 tem assim um papel central no comportamento da rede, controlando o caudal proveniente do rio, que garante a maior parte do caudal abastecido.

A simulação em período alargado do sistema, para uma duração de 24 horas, fornece como resultado a variação no nível do reservatório RNV 1 ilustrada na Figura 6.9. À primeira vista, o resultado afigura-se expectável, com a altura de água a variar entre o mínimo especificado de 4.00 m e um máximo de cerca de 6.60 m.

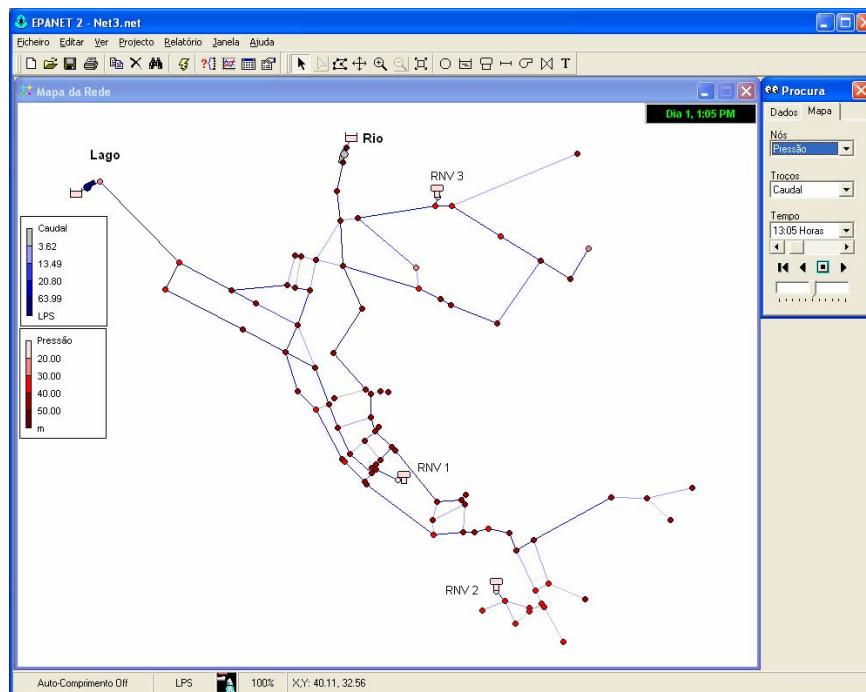



Figura 6.8 – Rede de abastecimento com 2 origens, instalações elevatórias e reservatórios[28].

[28] Adaptada a partir de um exemplo fornecido com o Epanet 2.0.

No entanto, se o mesmo modelo for simulado durante 120 horas (6 dias), a variação no nível do reservatório RNV 1 terá o aspecto ilustrado na Figura 6.10. Como se pode facilmente verificar, o funcionamento do reservatório só estabiliza, num ciclo de enchimento e esvaziamento estável e aproximadamente repetível, a partir do segundo dia da simulação.

Na realidade, o equilíbrio entre o abastecimento disponível a partir das duas origens e o consumo da rede provoca um ciclo de variação de nível menos pronunciado daquele que as primeiras 24 horas levam a crer, com o nível mínimo a estabilizar em cerca de 4.75 m e o nível máximo em 5.80 m, limite de funcionamento da estação elevatória do rio.

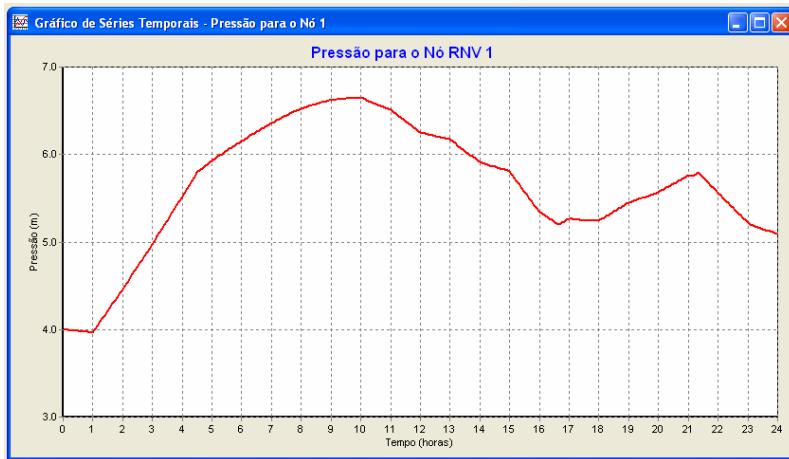



Figura 6.9 – Nível no reservatório RNV 1 para uma simulação de 24 horas

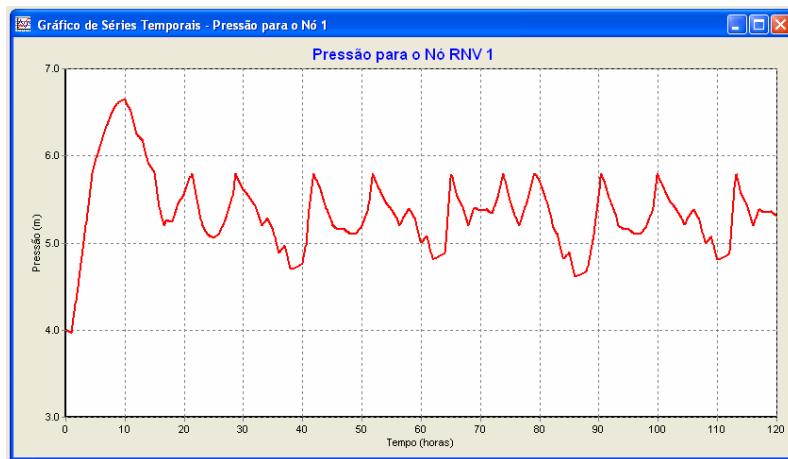



Figura 6.10 – Nível no reservatório RNV 1 para uma simulação de 120 horas

Por outras palavras, as primeiras 24 horas da simulação são atípicas – reflectem apenas o ajuste entre o estado inicial especificado pelo modelador para os reservatórios, o estado inicial das duas estações elevatórias, os caudais abastecidos e os caudais consumidos. O caudal abastecido ao reservatório RNV 1 é dependente da altura de água naquele, de duas formas: por um lado, o caudal bombeado depende da altura de elevação; por outro lado, como se referiu, o funcionamento da instalação elevatória do rio é controlado automaticamente de acordo com a altura de água no reservatório RNV 1.

Esta situação de modelação relativamente simples ilustra a dependência temporal dos reservatórios num processo de simulação em período alargado. Na utilização do modelo para a tomada de decisão deverá ser descartado o período em que o modelo efectua o ajuste inicial.

O modelo utilizado no exemplo está devidamente calibrado, o que terá sido verificado durante o seu desenvolvimento utilizando as técnicas apresentadas em 5. No entanto, para este sistema, a melhor forma de confirmar se a reprodução das condições operacionais é correcta, através das regras de operação que traduzem o funcionamento das bombas e válvulas e respectivos automatismos, consiste em observar o comportamento dos reservatórios.

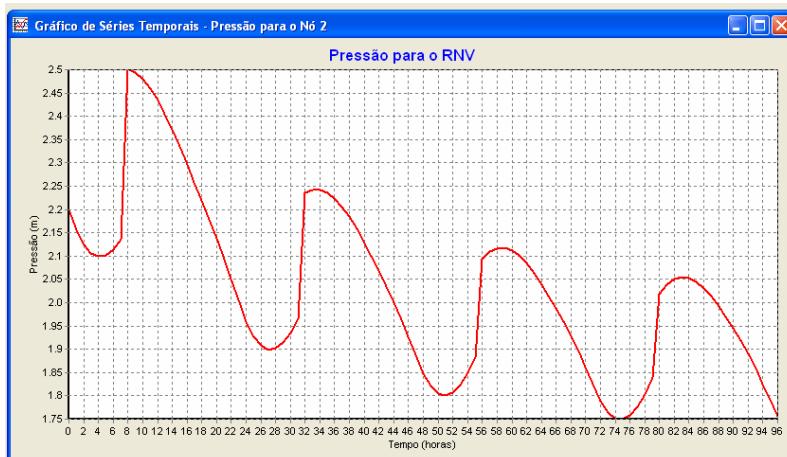



Figura 6.11 – Nível num reservatório para o qual o caudal abastecido pela estação elevatória não é suficiente para equilibrar o consumo.

A estabilidade do comportamento cíclico é um primeiro indicador de correcção – se o ciclo diário, por exemplo, conduzisse a um progressivo esvaziamento do reservatório (como no exemplo da Figura 6.11), tal significaria que a especificação das curvas das bombas e respectivos automatismos de funcionamento seriam insuficientes para equilibrar o consumo dependente do reservatório (o que poderia significar ter este sido sobre-avaliado).

Por outro lado, os limites de variação do nível (nos casos em que não são consequência de uma condição imposta *a priori*) e a forma como este varia ao longo do tempo constituem elementos de fácil verificação física (seja através de registos, por observação directa, ou sujeita à sensibilidade dos operadores) que permitem aferir da correcção do modelo.

6.2 Análise de qualidade da água

6.2.1 Introdução

6.2.1.1 Aspectos gerais

Como foi referido em 2.3.2 (pág. 21), os modelos do comportamento de parâmetros de qualidade da água que actualmente integram a generalidade dos programas de simulação – geralmente designados por *modelos de qualidade da água* –

simulam o movimento e transformação de substâncias físico-químicas ou bioquímicas que possam considerar-se como estando em solução na água. Exemplos de substâncias que são frequentemente objecto de simulação incluem o cloro residual, compostos halogenados (sub-produtos da desinfecção) e o flúor (sobretudo nos E.U.A.).

Os modelos permitem ainda o cálculo do tempo de percurso entre dois pontos da rede (ou entre as origens e os pontos de consumo), e da proporção da água originária de um qualquer nó que é consumida em todos os outros nós da rede – também designada por *rastreio* da água proveniente de origens específicas.

Os modelos de qualidade da água simulam três processos fundamentais (ver 2.3.2 e o Anexo A). Dois desses processos são devidos ao movimento da água, e são consequentemente governados pela hidráulica do sistema: o transporte ou advecção ao longo das condutas, e a mistura completa nos nós de junção.

O terceiro processo, que afecta substâncias não-conservativas, é o efeito conjunto de transformação inerente ao contacto e permanência dessa substância na água que circula no sistema, e que se pode dever a reacções com ela própria, com a água e com outras substâncias nela presentes, com o material que compõe as paredes de condutas e órgãos de armazenamento, e com o biofilme, sedimentos e partículas presentes no interior do sistema. O processo de transformação pode resultar em decaimento, crescimento ou transformação noutra substância.

Os modelos de qualidade da água surgiram no fim da década de 80, na sequência do sucesso atingido pelos modelos hidráulicos. Atingiram a sua actual maturidade a partir do fim da década de 90, tirando partido da generalização do uso da simulação em período alargado e dos modelos que incluem todas as condutas, tornados acessíveis pelo aumento da capacidade de processamento dos computadores pessoais vulgares.

6.2.1.2 Aplicações

A utilidade dos modelos de qualidade da água dá-se a 2 níveis:

(i) ao nível mais directo, permitem o cálculo da propagação de concentrações de parâmetros de qualidade, bem como do tempo de percurso e do rastreio da água proveniente de origens específicas;

(ii) de forma indirecta, contribuem para a qualidade dos modelos hidráulicos sobre os quais se baseiam, tanto pela exigência

adicional que sobre eles colocam, como pelos meios adicionais de aferição dos resultados que possibilitam.

Tal como os modelos hidráulicos, também os modelos de qualidade da água podem ser utilizados para:

- *simulação*, em que servem essencialmente para descrever os processos que ocorrem nos sistemas – funcionam como um complemento da monitorização (por amostragem ou outra), para dela inferir mais informação, de forma dirigida;
- *optimização de processos*, na procura de uma solução ideal para um problema de dimensionamento ou operação.

Alguns exemplos específicos da utilização de modelos de qualidade da água incluem:

- Planeamento de programas de amostragem;
- optimização do processo de desinfecção;
- localização de estações de re-cloragem;
- previsão dos efeitos do armazenamento;
- minimização de tempos de percurso;
- previsão da propagação de contaminantes e estabelecimento de estratégias de lavagem (*flushing*) de condutas;
- controlo das percentagens de água a misturar em sistemas com origens de águas diferentes;
- previsão de potenciais problemas de degradação de qualidade;
- comparação de estratégias operacionais.

Com a actual ênfase nos requisitos de qualidade da água, os quadros regulamentares cada vez mais exigentes, os crescentes custos de tratamento e manutenção de qualidade da água, e a visibilidade dos problemas de qualidade da água junto dos consumidores e agentes sociais, a modelação de qualidade da água deverá progressivamente desempenhar um papel central no planeamento, projecto e controlo operacional de sistemas de distribuição.

O advento dos grandes sistemas regionais e multi-municipais, com grandes extensões de conduta, e faseamentos importantes que levam à predominância de condições de escoamento desfavoráveis (baixas velocidades devidas a baixos caudais, grandes tempos de percurso) têm trazido à evidência a necessidade de utilizar a modelação de qualidade da água como principal ferramenta de análise dos sistemas, bem como a conveniência em essa análise ser efectuada de forma global e integrada, e não apenas como mera verificação das condições hidráulicas em troços de adutora.

6.2.1.3 Dependência temporal

Apesar de o equilíbrio hidráulico geral da rede de condutas, num qualquer momento de uma simulação em período alargado, ser atingido instantaneamente e de forma independente do momento anterior, no ponto 6.1.2 foram já focados aspectos do cálculo hidráulico, ligados ao funcionamento dos reservatórios e instalações elevatórias, em que existe uma dependência directa da variável temporal. Como foi ilustrado nessa secção do texto, tal obriga a que a simulação corra durante um período de tempo suficiente para ser atingido um ciclo diário repetível e aproximadamente estável.

No caso da simulação de parâmetros de qualidade da água, os processos simulados – sobretudo a advecção (transporte) e a transformação de substâncias não-conservativas – são intrinsecamente dependentes do tempo. O seu cálculo, tal como descrito em 2.3.2 e no Anexo A, é efectuado através da integração no tempo e no espaço de várias das variáveis envolvidas. Tal significa que os resultados traduzem uma sequência em que cada conjunto de valores, para determinado momento no tempo, é directa e estreitamente dependente do momento anterior.

Assim, tal como se ilustrou no ponto 6.1.2 a propósito dos reservatórios, também qualquer simulação de qualidade da água em período alargado deverá correr por um período inicial de estabilização, até ser atingido um ciclo repetível nos valores das concentrações do parâmetro estudado, em toda a rede.

A excepção a este princípio geral é o caso dos modelos que pretendem simular situações operacionais que pela sua própria natureza não resultam num ciclo repetível dos níveis nos reservatórios, do estado de bombas e válvulas, ou dos parâmetros de qualidade da água, incluindo o tempo de percurso. A esse respeito são tecidas algumas considerações no final do ponto 6.2.2.

6.2.1.4 Aplicabilidade e restrições

Os modelos de qualidade da água, quando correctamente implementados, são uma ferramenta eficaz para o estudo da melhor localização dos pontos de cloragem no sistema e o respectivo doseamento.

No entanto, a experiência demonstra claramente que a sua eficácia depende de serem verificadas as seguintes condições fundamentais:

(i) O modelo deverá ser completo, ou seja, deverá incluir todas as tubagens através das quais possa ocorrer escoamento no sistema;

(ii) O modelo hidráulico em que se baseia deverá estar cuidadosamente calibrado, nomeadamente no que diz respeito às perdas de carga unitárias e, de forma crucial, aos consumos a satisfazer;

(iii) As condições operacionais para as quais se pretende trabalhar deverão estar bem modeladas;

(iv) No estudo de parâmetros não-conservativos, como o cloro residual, as respectivas cinéticas de decaimento deverão estar bem caracterizadas, tanto em relação às reacções no seio da água como àquelas devidas ao contacto com as paredes dos componentes do sistema, especificamente para a(s) água(s) a circular no sistema em causa [29].

A condição (ii) é um domínio em que os sistemas de adução apresentam menos dificuldades do que os sistemas de distribuição urbana, pois alimentam um número limitado de pontos de consumo (venda), e possuem habitualmente medição contínua de caudais através da rede, nomeadamente nas entregas. A estimativa de perdas de carga é simplificada nos troços de construção recente, pelo melhor conhecimento do seu estado. Já nos sistemas de distribuição, é usual uma maior dificuldade na correcta estimativa dos coeficientes de rugosidade, pela maior variedade de materiais e idades, e maior dificuldade em manter actualizado o registo cadastral.

Por outro lado, (iii) poderá parecer uma condição redundante, dada a condição (ii). No entanto, é frequente os sistemas adutores com um número considerável de reservatórios de percurso ou entrega e com bombeamentos intercalares revelarem um comportamento muito mais complexo do que o seu aspecto linear deixa antever. A interacção dos vários reservatórios e grupos elevatórios é sensível

[29] A variabilidade das condições ambientais, dos tipos de água e das suas interacções com os sistemas faz com que a utilização de constantes e modelos obtidos para outros casos perca claramente a validade.

e os modos de operação são frequentemente complicados, o que exige rigor e cuidado adicionais na sua modelação.

Para a correcta aplicação dos resultados da modelação, parte-se assim do princípio que as condições (i) a (iii) serão satisfeitas. Os resultados obtidos através de modelos aproximados ou não calibrados, como é o caso dos utilizados na fase de planeamento / dimensionamento, ou fazendo uso de estimativas de consumo pouco fiáveis, não poderão ter um grau de precisão superior ao dos dados em que se baseiam.

6.2.2 Tempo de percurso

6.2.2.1 Aspectos gerais

Uma das variáveis cuja simulação permite inferir informação mais valiosa sobre a qualidade da água de um sistema é, na realidade, uma variável puramente hidráulica: o tempo de percurso[30].

O cálculo do tempo de percurso médio de uma molécula de água entre dois pontos (habitualmente, entre a origem de abastecimento e os pontos de consumo) é efectuado por integração dos valores da velocidade, ao longo do tempo e ao longo do(s) percurso(s) entre os dois pontos, assumindo-se a mistura completa nos nós.

O tempo de percurso permite um ganho de sensibilidade muito apreciável ao funcionamento hidráulico de um sistema, incluindo a percepção dos caminhos preferenciais, das zonas de menor movimento ou de estagnação, e das zonas em que poderá ser mais ou menos significativo, por exemplo, colher amostras para controlo de qualidade da água.

6.2.2.2 Localização de pontos de amostragem

A colheita de amostras para determinação de parâmetros de qualidade da água nos sistemas pode normalmente servir dois objectivos:

---

[30] Por vezes também designado por *tempo de residência no sistema*, ou ainda *idade da água*. A designação de tempo de percurso afigura-se, no entanto, mais correcta.

(i) o controlo de qualidade do processo de transportar e distribuir água potável; e

(ii) a verificação de conformidade legal, no ponto de consumo.

O primeiro objectivo é um dos principais vectores da gestão técnica da própria entidade gestora, enquanto que o segundo é essencialmente um mecanismo externamente imposto para defesa do consumidor e da saúde pública. É frequente o primeiro implicar uma amostragem mais detalhada do que o segundo, e portanto, incluí-lo como subconjunto do seu universo.

Em qualquer dos casos, a localização e a frequência com que as amostras são recolhidas são de capital importância para a significância dos resultados. Na realidade, a amostragem estatística é um instrumento cujos resultados podem ser facilmente enviesados se a escolha dos pontos e frequências de amostragem se basear em critérios subjectivos ou pouco científicos, mesmo na presença de um universo de pontos de igual importância ou significado.

Por outro lado, o desconhecimento dos caminhos preferenciais do escoamento na rede, dos tempos de percurso e do consumo que depende, para jusante, de cada potencial ponto de amostragem (ou seja, da sua área de influência, calculada em termos de caudal e de um tempo de percurso de referência [31]), pode levar à escolha de pontos de amostragem irrelevantes, não significativos ou de significância desconhecida. Por outras palavras, o universo dos pontos de amostragem possíveis não é constituído por elementos de igual importância ou significado, pelo que a sua escolha deverá obedecer a critérios racionais, objectivos e quantificáveis [32]. Nesta medida, o recurso a modelos de simulação bem calibrados que possam calcular, pelo menos, os tempos de percurso [33], pode ser de uma utilidade crucial.

---

[31] Consultar, a este propósito, NACE *et al.* (1997) ou DIAS *et al.* (2000).

[32] Idem.

[33] Note-se que o tempo de percurso é uma variável essencialmente *hidráulica*, no sentido em que é directa e exclusivamente dependente da velocidade de escoamento em cada troço e em cada instante.

6.2.2.3 *Exemplo ilustrativo*

A rede esquematizada na Figura 6.12 serve uma zona urbana predominantemente residencial, para além de uma área industrial. A rede é servida por um reservatório apoiado (simulado como um RNV), composto por duas células com capacidade de 1000m3 cada. O desnível topográfico entre o reservatório apoiado e a zona habitada varia entre 45 e 150m.

O modelo hidráulico desta rede encontra-se calibrado para pressões. A rede é relativamente sensível à perda de carga, e possui desníveis topográficos importantes, o que permitiu uma calibração de algum detalhe. O primeiro cuidado a verificar para o estabelecimento de um modelo de qualidade da água é a duração mínima necessária para a inicialização da rede com valores ciclicamente estáveis da variável simulada, neste caso o tempo de percurso.

Embora os simuladores actuais permitam inicializar os nós da rede com valores da variável simulada para o instante zero, o que é facto é que não é fácil existir conhecimento sobre esses valores na realidade. Tratando-se de uma concentração, ainda se poderia conceber a obtenção de alguns desses valores por amostragem, a um custo que rapidamente se tornaria proibitivo. Tratando-se de tempo de percurso, não existe forma simples de o estimar através de medições no terreno, e portanto a possibilidade não está disponível.

A alternativa mais viável para ambos os casos não é inicializar a rede, mas antes correr a simulação por um período de tempo suficiente para que os valores da variável simulada, em todos nós da rede, sigam um ciclo repetível e aproximadamente estável. Por outras palavras, utilizar o modelo para gerar uma inicialização sintética em toda a rede.

Assim, deverá correr-se o modelo para uma simulação de duração suficientemente longa – por exemplo, uma semana – e determinar-se qual o maior valor do tempo de percurso que ocorre, e em que nó. Deve ainda verificar-se se esse tempo estabiliza ou regride, dentro do espaço de tempo simulado, pois caso contrário será necessário aumentar a duração da simulação.

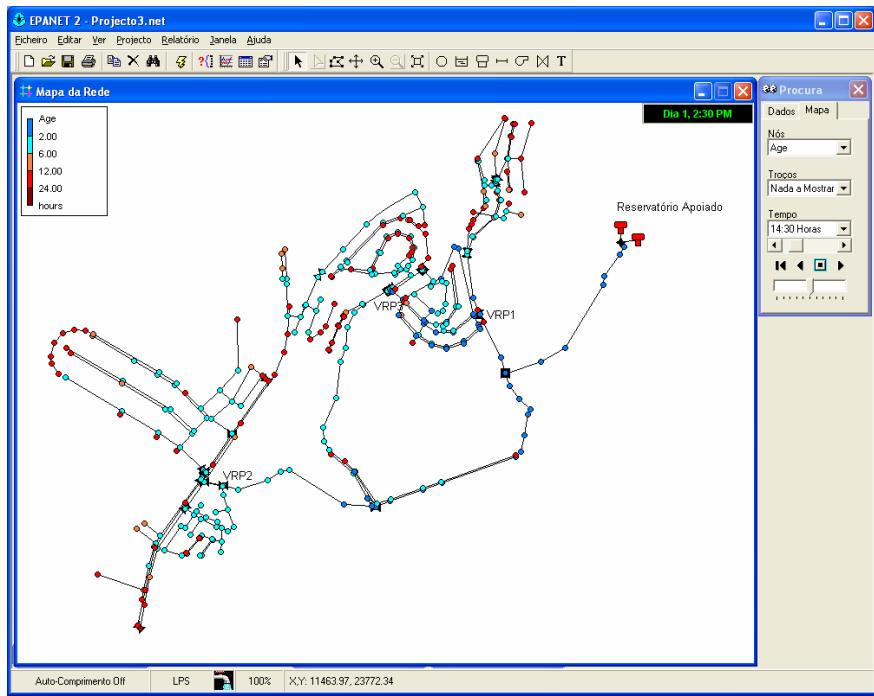



Figura 6.12 – Sistema de distribuição.

Uma vez determinado o máximo tempo de percurso, o primeiro ciclo diário cujos resultados são significativos é aquele que ocorre após esse tempo de percurso máximo.

Exemplificando, o Quadro 6.1 mostra os resultados da simulação para tempo de percurso em toda a rede (o quadro mostra ainda o consumo no nó, para evitar tomar em consideração nós sem consumo, nos quais o tempo de percurso cresce continuamente ao longo de toda a simulação, por não circular através deles qualquer caudal).

O tempo de percurso máximo na rede acima é de 42 horas, o que significa que só deverão ser considerados significativos em toda a rede os resultados de simulação obtidos para o terceiro dia e seguintes – embora tipicamente a maior parte dos nós possa atingir o estado cíclico estável muito antes disso. As zonas de rede com maior consumo terão tempos de percurso necessariamente maiores.

Quadro 6.1 – Resultados para os nós da rede, ordenados por tempo de percurso.

Tabela da Rede - Nós às 42:15 Horas

ID do Nó	Consumo LPS	Age hours
Nó 267	0.02	28.14
Nó 256	0.01	28.36
Nó 143	0.00	29.93
Nó 62	0.01	30.13
Nó 146	0.01	30.17
Nó 145	0.00	30.17
Nó 259	0.01	30.52
Nó 156	0.00	31.90
Nó 344	0.01	33.60
Nó 85	0.01	36.08
Nó 148	0.00	36.18
Nó 104	0.00	36.20
Nó 254	0.01	42.00
Nó 376	0.01	42.01

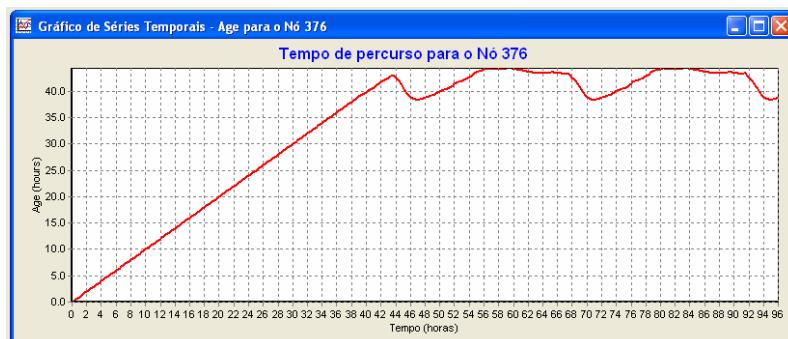



Figura 6.13 – Gráfico temporal do tempo de percurso para o nó 376

A Figura 6.13 mostra o gráfico temporal do tempo de percurso no nó 376, onde o tempo de percurso máximo é de 42 horas. É visível o período inicial em que o valor do tempo de percurso cresce, desde o valor zero até ao ponto em que chega ao nó a primeira água que efectuou todo o percurso (ou percursos) desde a origem. A partir daí, começa a verificar-se o comportamento cíclico repetível e aproximadamente estável.

Ilustrando agora a utilidade da variável tempo de percurso para, por exemplo, a selecção de pontos de amostragem, a Figura 6.14 mostra um detalhe da rede numa zona em que a entidade gestora costuma recolher amostras de parâmetros de qualidade.

Concretamente, o ponto habitual de recolha é na zona dos nós 246 e 253, numa rua onde existem condutas de ambos os lados. As amostras podem ser recolhidas em ambos os lados da rua, havendo pontos de acesso que são utilizados indiscriminadamente.

A Figura 6.15 mostra o gráfico temporal do tempo de percurso nos dois nós. Torna-se imediatamente evidente que uma das condutas tem um tempo de percurso muito superior. Tal deve-se a um caudal muito menor, e a um acumular de valores baixos de velocidade a montante, tendo a água que circula nas duas condutas percursos, a montante, bastante distintos.

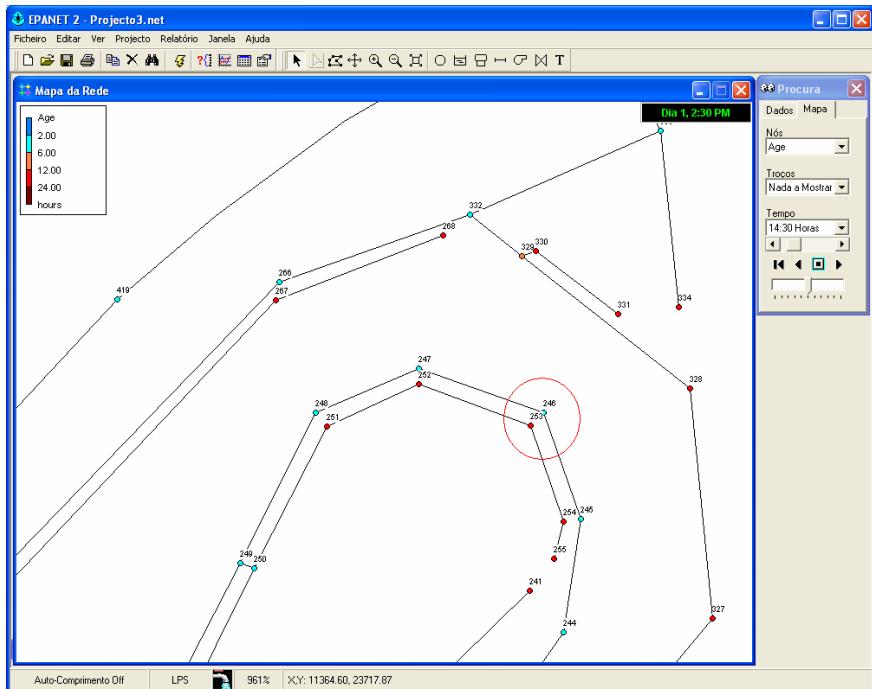



Figura 6.14 – Detalhe da rede, mostrando a localização dos pontos de amostragem habitual (círculo a vermelho), nos nós 246 e 253.

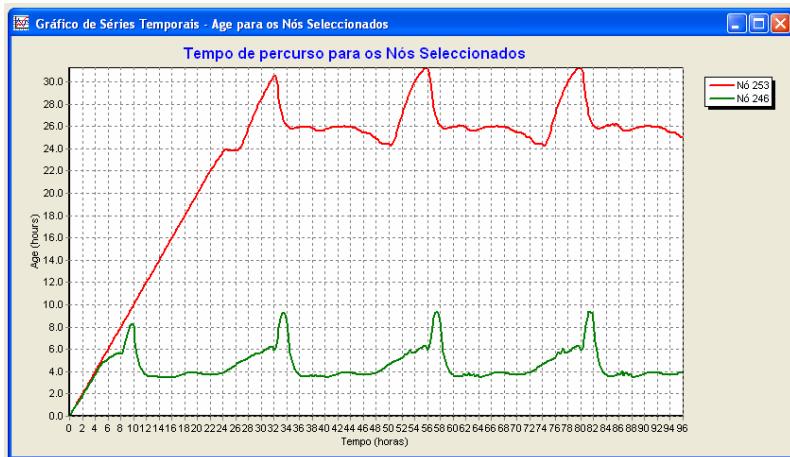



Figura 6.15 – Gráfico temporal do tempo de percurso nos nós de amostragem (246 e 253).

Uma vez que a rede em causa não tem habitualmente problemas de qualidade da água, esta particularidade não foi detectada no funcionamento normal dos programas de amostragem, sendo as amostras recolhidas de um ou outro lado da rua. No caso de ocorrência de um potencial problema de qualidade, a amostragem regular poderia não ser capaz de identificá-lo. Com o benefício do modelo, parece evidente que o lado do nó 253 poderá ser mais significativo para o propósito de identificar efeitos de tempo de percurso excessivo.

O modelo de simulação torna-se assim na única ferramenta capaz de identificar com clareza este tipo de situações, e de permitir uma tomada de decisão informada sobre a escolha dos pontos de amostragem, entre muitos outras aplicações.

Por outro lado, o tempo de percurso é uma variável bastante expressiva das características do comportamento hidráulico de um sistema que maior influência têm na qualidade da água distribuída. Uma vez que se trata de um cálculo puramente hidráulico, tem a vantagem de ficar disponível assim que o modelo hidráulico estiver em condições de ser utilizado para os fins em vista, sem necessitar de determinações adicionais, como no caso da simulação de parâmetros não-conservativos, descrita em 6.2.4.

6.2.3 Rastreio da água proveniente de determinada origem

A determinação da proporção da água originária de um qualquer nó que é consumida em todos os outros nós da rede – também designada por *rastreio* da água proveniente de uma determinada origem – é uma componente bastante útil da panóplia disponível nos actuais modelos de simulação. Trata-se de um cálculo de raiz essencialmente hidráulica, tal como o tempo de percurso, e igualmente disponível logo na fase de modelação hidráulica.

A Figura 6.16 e a Figura 6.17 representam dois momentos numa simulação de 24 horas de duração para a rede anteriormente apresentada em 6.2.2.

A variável representada através da codificação de cores é o rastreio da água proveniente da captação no lago. Na rede em causa, as duas origens de água possuem características bastante diferentes, sendo o rio de pior qualidade – a sua utilização é essencialmente para reforço nas horas de maior consumo. Pretende-se conhecer a área de influência das duas origens.

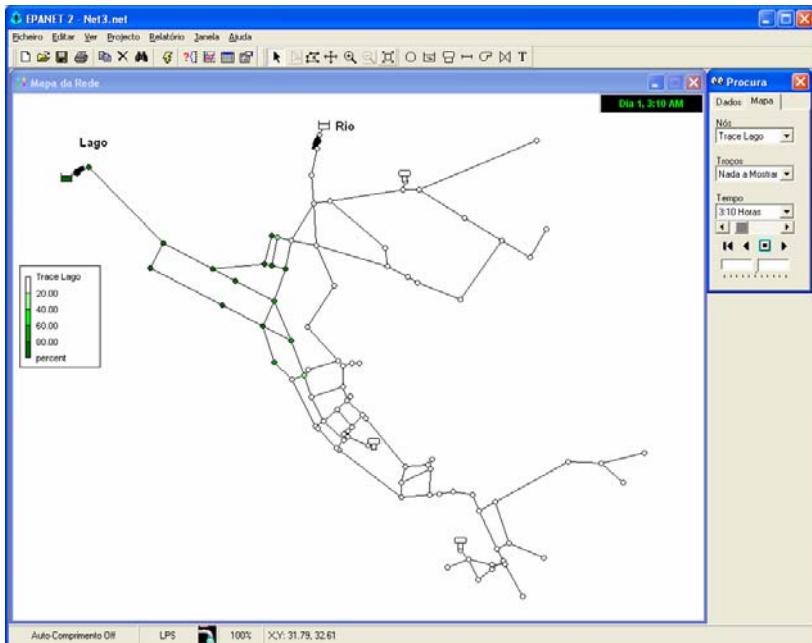



Figura 6.16 – Rastreio da água proveniente da captação no lago, nas horas iniciais da simulação.

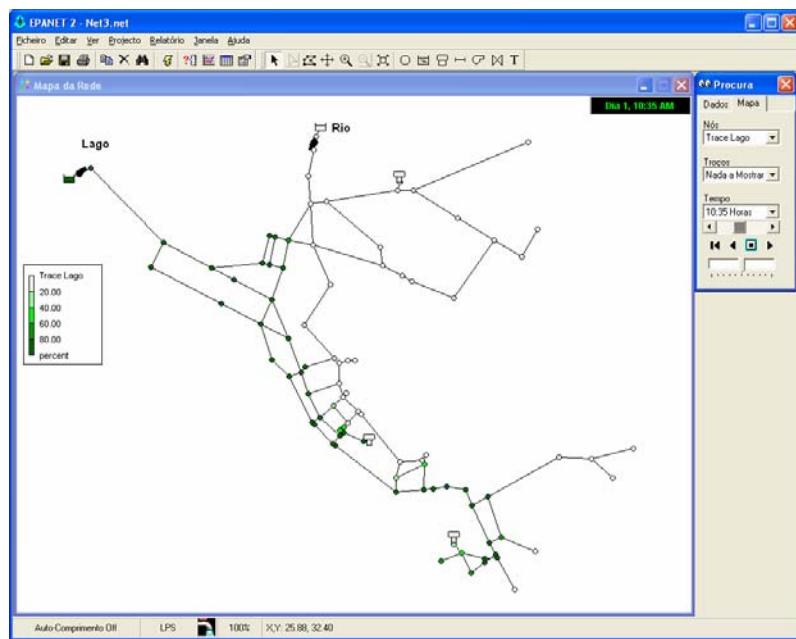



Figura 6.17 – Rastreio da água proveniente da captação no lago, à hora a que se dá a maior expansão da sua área de influência.

A primeira figura representa a distribuição da percentagem de água distribuída, proveniente do lago, nas horas iniciais de simulação; a segunda figura mostra o momento em que aquela distribuição atinge a maior expansão. Dado o escalonamento temporal e a forma como são controladas as instalações elevatórias das duas origens, a distribuição de área de influência não é constante ao longo do tempo.

A representação gráfica é perfeitamente expressiva do potencial da modelação para o ganho de sensibilidade ao funcionamento de um sistema.

6.2.4 Concentração de parâmetros não-conservativos: o caso do cloro residual

6.2.4.1 Conceitos gerais

O cloro residual reage facilmente com diversas espécies orgânicas e inorgânicas presentes quer na água transportada, quer na interface com os elementos físicos do sistema, nomeadamente tubagens e reservatórios. Este decaimento é, usualmente, dividido em duas componentes: decaimento no seio da água e decaimento na parede.

A totalidade das reacções que ocorrem, assim como os respectivos mecanismos e velocidades, não são ainda hoje conhecidos mas, em geral, as reacções com as espécies inorgânicas são mais rápidas do que com as espécies orgânicas. A velocidade com que cada uma destas reacções ocorre é função da espécie em causa e de outros factores como o pH e temperatura da água, concentrações dos reagentes envolvidos, o facto de existir complexação por matéria orgânica (só aplicável em alguns casos) e o estado de oxidação em que a espécie já se encontra.

A interacção de parede inclui a reacção do cloro com o próprio material das tubagens, com biofilmes aderentes à sua superfície ou com sedimentos acumulados em pontos baixos do sistema de distribuição. Ocorre, quer quando os materiais são novos, quer quando já se encontram em operação há vários anos, sendo o tipo de reacções diferentes nas duas situações. No caso de materiais sintéticos a interacção é fraca se a tubagem é nova, sendo porém já significativa quando se desenvolvem camadas de biomassa fixa nas paredes internas. Por outro lado, a reacção com o material poderá ser significativa no caso de tubagens metálicas devido ao fenómeno da corrosão.

6.2.4.2 Determinação de constantes cinéticas de decaimento no seio da água

O avanço do conhecimento sobre o decaimento do cloro residual tem sido feito essencialmente na componente do consumo de cloro no seio da água, nomeadamente na sua quantificação do ponto de vista experimental.

Uma vez que o desaparecimento do cloro no seio da água não depende dos materiais das tubagens, mas somente das características da água, podem ser efectuados testes em laboratório para determinação das constantes cinéticas que

caracterizam esse decaimento. Estes testes de garrafa são realizados de acordo com o procedimento apresentado no Quadro 6.2 e na Figura 6.18.

Quadro 6.2 – Procedimento para determinação da constante cinética de decaimento no seio da água.

PROCEDIMENTO:

① Preparação de um grande volume de água fortificada pela mistura de água da rede com um reagente de cloro.

② Divisão desta mistura por vários frascos de vidro escuro do tipo Winkler, completamente cheios e hermeticamente fechados. Estes frascos foram submetidos a uma preparação prévia de modo a eliminar a carência de cloro do material.

③ Manutenção dos frascos a uma temperatura constante.

④ Ao fim de intervalos de tempo pré-determinados, abertura de um frasco e determinação da concentração do cloro residual.

⑤ Representação gráfica dos valores da concentração de cloro em função do tempo.

Para a determinação de valores de constantes cinéticas de decaimento de cloro para utilização em modelação, os resultados obtidos nos testes de garrafa são ajustados através de modelos cinéticos que descrevem a diminuição da concentração de cloro ao longo do tempo.

Na última década foram propostas várias leis cinéticas globais. O modelo de 1ª ordem, onde a velocidade da reacção é proporcional à concentração de cloro, é o de maior simplicidade e o tradicionalmente usado nos modelos de simulação. Porém, o modelo de primeira ordem paralela parece proporcionar melhores ajustes e maior flexibilidade de utilização em modelos de simulação de qualidade da água nas redes (Vieira, Coelho e Loureiro, 2005; Vieira e Coelho, 2000; Haas e Karra, 1984).

6.2.4.3 Determinação de constantes cinéticas de decaimento devido ao efeito de parede

A determinação, o mais precisa possível, dos parâmetros do decaimento devido às reacções que ocorrem com as paredes dos componentes do sistema passaria provavelmente pela análise exaustiva em laboratório do comportamento da água em contacto

com tubagens retiradas da rede, em variedade de materiais, idades e condições representativas da rede em estudo. No entanto, não é viável estabelecer tal conhecimento sem custos apreciáveis que, em termos práticos, não se coadunam com as necessidades de utilização corrente da modelação de qualidade da água.

No entanto, podem ser conseguidas estimativas viáveis, em função dos objectivos pretendidos, recorrendo a medições diferenciais de cloro residual na rede, após o conhecimento das características do decaimento no seio da água.

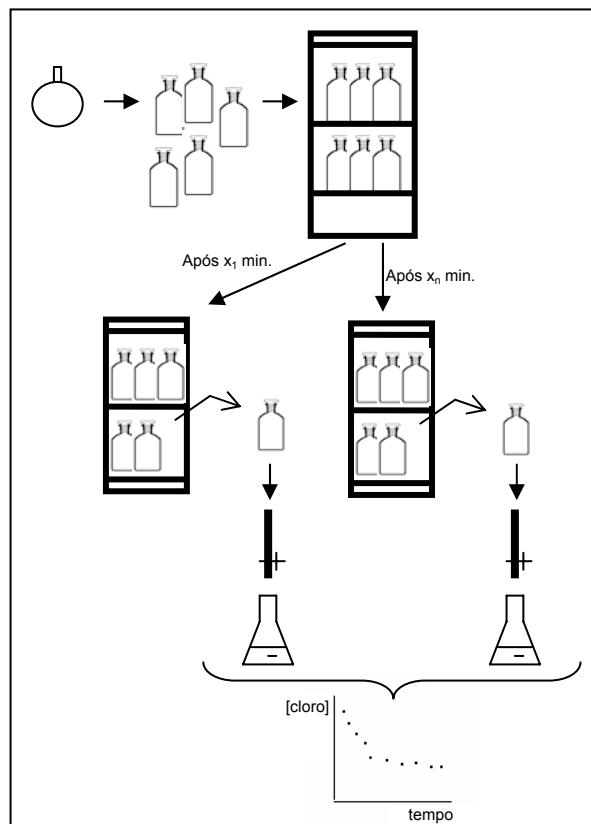



Figura 6.18 – Esquematização do procedimento para determinação da constante cinética de decaimento no seio da água.

Para tal, é necessário identificar troços, entre pontos de amostragem, onde se verifique um tempo de percurso suficiente

para permitir identificar o efeito a partir da diferença entre as medições de cloro residual nas secções de montante e de jusante. Tal dependerá da magnitude desse efeito, o que variará com o tipo de material e estado da conduta.

Será necessário dispor de medições ou estimativas fiáveis de caudal para esses troços, por forma a permitir calcular o tempo de percurso. Caso não seja possível efectuar medições directas de caudal (recorrendo a medidores fixos ou portáteis) ou recorrer a estimativas baseadas no funcionamento de órgãos hidráulicos (parâmetros de funcionamento de bombas, diferenças de nível em reservatórios), esta fase pode ser realizada com o apoio de um modelo hidráulico bem calibrado. Para tal, é imprescindível escolher troços de conduta correspondentes a uma significativa aglomeração de consumo (nas zonas de montante da rede), em que a respectiva variabilidade tenha um peso menor na precisão dos valores do escoamento modelado.

Deduzindo a parcela de decaimento no seio da água, obtida por intermédio de cinética determinada laboratorialmente para condições semelhantes, obter-se-á uma indicação da importância relativa da parcela do decaimento devida à interacção com a parede.

Para este tipo de determinações deverão ser testados os tipos de conduta (material / idade) mais importantes no sistema. É previsível que a gama passível de ser testada seja limitada pela disponibilidade de pontos de amostragem e de medição ou estimativa de caudal.

6.2.4.4 Tempo de percurso e decaimento do cloro residual

Como é descrito anteriormente, o teor de cloro residual da água tratada diminui gradualmente desde a estação de tratamento ou ponto de cloragem até à torneira do consumidor, devido a reacções que ocorrem quer no seio da água, quer na interface com as paredes dos componentes do sistema. O cloro residual presente na água liberta-se ainda para a atmosfera através da superfície livre em reservatórios e outros órgãos de armazenamento.

Qualquer dos efeitos é directamente dependente do tempo de percurso da água no interior do sistema e do tempo de residência nos reservatórios. Para o caso clássico dos sistemas de distribuição urbana, em que os tempos de percurso são tipicamente de algumas horas e existe um número reduzido de reservatórios, um único ponto de cloragem na ETA a montante é usualmente

suficiente para garantir valores aceitáveis de cloro residual em toda a rede.

Para sistemas de adução de dimensões consideráveis, em que a água viaja grandes extensões e onde existe um número maior de reservatórios, por vezes de grande capacidade, os tempos de percurso são de uma ordem de grandeza claramente superior, podendo facilmente atingir vários dias.

Como foi já anteriormente referido, este efeito é particularmente sentido nos anos iniciais da exploração, tanto por ocorrerem consumos nominais inferiores aos utilizados no dimensionamento do sistema, como pelo facto de o sistema não estar ainda a abastecer a totalidade dos seus clientes prospectivos. A consumos inferiores aos previstos corresponderão velocidades de escoamento baixas e maiores tempos de percurso.

Por se tratar de uma grandeza de difícil contabilização sem o recurso criterioso a modelos, este problema pode facilmente passar despercebido durante todo o processo de planeamento, projecto e construção ou expansão, até à constatação, já em plena operação dos sistemas, de níveis de cloro residual inferiores ao desejável, ou ainda – o que será mais grave – de valores demasiado altos para os parâmetros microbiológicos.

Saliente-se que o problema dos longos tempos de percurso é também frequentemente encontrado nos sistemas de distribuição, nomeadamente nas zonas ramificadas terminais com baixos consumos, em que muitas vezes os diâmetros são sobredimensionados, por razões que vão desde a necessidade de satisfazer caudais de incêndio, a estimativas de consumo e/ou adopção de coeficientes de ponta excessivos no projecto (Alegre e Coelho, 1998).

6.2.4.5 Optimização da (re)cloragem

A ocorrência de grandes tempos de percurso poderá inviabilizar a utilização de um único ponto de cloragem no sistema, pois para serem obtidos nos pontos de consumo a jusante valores de cloro residual dentro da gama recomendável [34] seria necessário

---

[34] A gama habitualmente utilizada é de 0.20 a 0.50 mg/l, de acordo com as recomendações da Organização Mundial de Saúde e com muitos dos enquadramentos normativos que contemplam este aspecto, podendo o limite

introduzir valores demasiado altos a montante. Assim, em sistemas com grandes tempos de percurso é frequente o recurso a pontos de reforço de cloragem.

A sua localização no sistema, bem como a dosagem a ser utilizada em cada posto, constituem um problema com alguma complexidade cuja optimização só pode efectivamente ser correctamente abordada por recurso a um bem calibrado modelo de simulação com, pelo menos, a possibilidade de calcular tempos de percurso. Os investimentos que estão normalmente envolvidos, e o risco de não ser atingida uma solução suficientemente eficaz do ponto de vista da saúde pública, mais do que justificam o esforço de desenvolver uma ferramenta que, como se menciona adiante, traz múltiplos benefícios em quase todas as áreas da gestão técnica dos sistemas.

6.2.4.6 Metodologia para modelação do comportamento do cloro residual em sistemas de distribuição

Descreve-se seguidamente a metodologia geral preconizada por Vieira (2000) para a abordagem à modelação de cloro residual e tempo de percurso, em sistemas de transporte e distribuição de água. A metodologia pressupõe a existência prévia de um modelo hidráulico, adequadamente actualizado e calibrado.

a) Análise das condições de operação e funcionamento do sistema

Esta fase é destinada a um conhecimento da topologia, dos modos de funcionamento do sistema adutor, das condições operacionais e dos principais percursos de caudal. Utiliza-se, para tal, informação operacional actualizada para alimentar o modelo e analisar os principais cenários de operação. Procura-se obter estimativas dos tempos de percurso e das gamas de tempos a analisar na determinação das cinéticas de cloro residual, bem como identificar os pontos de recolha de amostras e os troços passíveis de serem utilizados na determinação do efeito de decaimento na parede. Para esta actividade, é necessária a disponibilização de informação cadastral e operacional, bem como registos de caudal e de cloro residual (se existentes) e outra informação relevante.

---

superior ser mais alto; muito embora a actual Directiva Europeia, e a respectiva implementação na legislação nacional, não privilegiem o teor de cloro residual como forma de controlo da qualidade microbiológica no ponto de consumo, é um facto que a gama anteriormente citada continua a ser uma referência para as entidades que utilizam daquele desinfectante.

b) Análise do registo histórico de amostragem de cloro residual e outras características relevantes da água

Nesta fase, é levada a cabo uma análise do registo histórico de amostragem de cloro residual e outras características relevantes da água, tais como COT (carbono orgânico total), ferro, manganês, amónia e temperatura. A análise, não exaustiva, destina-se fundamentalmente a obter um primeiro levantamento das variáveis a ter em conta, do universo dos pontos de amostragem possíveis e daqueles que serão preferenciais para as determinações a efectuar.

c) Caracterização da cinética de decaimento de cloro no seio da água

c.1) Recolha de amostras

Recolha de amostras de água para realização dos testes laboratoriais de decaimento de cloro, em pontos seleccionados. Estes deverão sempre incluir um ponto imediatamente antes da cloragem, que no caso das redes de distribuição sem re-cloragem é normalmente suficiente. Para redes de maior extensão e envolvendo mais do que uma cloragem, convém incluir igualmente os pontos a montante das re-cloragens.

c.2) Produção e análise de curvas de decaimento

Realização de testes laboratoriais de determinação da cinética do cloro no seio da água, de acordo com a metodologia anteriormente descrita (ver Quadro 6.2 e na Figura 6.18).

d) Caracterização da cinética de decaimento de cloro em contacto com o sistema

A determinação do decaimento devido às reacções que ocorrem com as paredes dos componentes do sistema pode ser efectuada recorrendo a medições diferenciais na rede. É necessário identificar o conjunto de características de tubagem (materiais e idades) considerados preponderantes no sistema em causa, e seleccionar troços do sistema em que as condições anteriormente descritas se verifiquem:

- existência de medição ou estimativa fiável de caudal;
- existência de pontos de amostragem no início e no fim do troço;
- ocorrência de tempos de percurso relevantes para a água e material em causa, nomeadamente abarcando períodos de caudal mínimo (períodos nocturnos).

e) Análise global e estabelecimento de recomendações para a modelação do cloro residual

Análise global dos resultados obtidos; selecção e caracterização dos melhores modelos cinéticos para o decaimento do cloro residual, de acordo com o exposto anteriormente (consultar ainda Vieira e Coelho, 2000; Vieira, 2001).

f) *Aplicação ao modelo de simulação do sistema e respectiva calibração contra medições de campo.*

Integração dos resultados de c), d) e e) no modelo de simulação do sistema e análise do modelo por forma a escolher os pontos de calibração de cloro mais significativos. Na sua selecção devem figurar pontos extremos da rede, mas também pontos nas condutas de maior diâmetro, onde a agregação de consumos confira uma maior fiabilidade aos resultados gerados pelo modelo hidráulico subjacente. Deve observar-se uma tolerância no fecho da calibração não inferior à precisão dos instrumentos de medição utilizados[35].

Deve procurar-se uma coincidência não só dos valores das concentrações medidas e simuladas, como do seu comportamento ao longo do tempo. Deve atender-se ao facto de o decaimento do cloro ser essencialmente lento, de forma que para tempos de percurso curtos o comportamento deste parâmetro pode aproximar-se do de um traçador quase conservativo. Assim, será conveniente obter em cada ponto de calibração uma sequência de medições cobrindo várias horas. Não é absolutamente necessário que haja simultaneidade nas medições entre os diversos pontos de calibração, mas deverá existir medição contínua de caudal e do residual de cloro no(s) ponto(s) de entrada na rede durante todo o período em que são feitas medições de calibração, por forma a possibilitar a geração de simulações completas.

6.2.4.7 Simulação de condições operacionais irregulares

Como foi referido anteriormente, uma excepção ao princípio geral da procura da estabilização de um comportamento cíclico para análise dos resultados da simulação é o caso em que o sistema e as condições operacionais simuladas não proporcionam uma ciclicidade estável.

Nesse caso, deverá exercer-se o maior cuidado para destrinçar o período em que o modelo inicializa os valores das variáveis de estado dependentes do tempo (níveis de reservatórios, tempo de

---

[35] Entre 0.01 e 0.03 mg/l para os medidores portáteis de cloro comuns, que deverão sempre ser calibrados contra determinações laboratoriais antes de cada saída.

percurso, parâmetros de qualidade da água), do período em que os resultados são já representativos do cenário simulado.

Uma outra dificuldade, relacionada com esta, é o facto de o mesmo ponto de amostragem poder apresentar uma ciclicidade do tempo de percurso com um período diferente de 24 horas – o que tem como consequência que amostras colhidas nesse ponto, à mesma hora e em dias semelhantes fornecem resultados diferentes, por razões intrinsecamente hidráulicas.

6.3 Utilização de modelos para planeamento e projecto

6.3.1 Nota introdutória

O presente sub-capítulo tem como objectivo apresentar e discutir a utilização da simulação no contexto do planeamento e projecto de sistemas de abastecimento de água. Embora existam aplicações de simulação que já têm incorporados algoritmos de dimensionamento (p.ex., Haestad Methods, 2005; MWH Soft, 2005), o grande potencial do uso de modelos de simulação revela-se sobretudo ao nível da análise de cenários que permitem verificar o comportamento da rede atendendo aos múltiplos objectivos do planeamento e projecto.

Neste sub-capítulo, são sintetizados os potenciais usos da modelação no campo do planeamento (ver 6.3.4) e do projecto (ver 6.3.5), por oposição às abordagens tradicionalistas ainda largamente adoptadas (ver 6.3.2). Descrevem-se os principais parâmetros a considerar na fase de projecto (ver 6.3.6) e efectua-se uma breve síntese dos métodos de dimensionamento usualmente empregues (ver 6.3.7), assim como das técnicas para modelação de situações específicas, como a verificação de caudais de incêndio (ver 6.3.8).

6.3.2 Abordagem tradicionalista

Na visão mais tradicionalista do ensino da engenharia civil, os técnicos aprendem a projectar sistemas novos de abastecimento de água – de raiz ou, hoje em dia de forma cada vez mais frequente, como extensão, renovação ou reabilitação de sistemas existentes – com base em procedimentos mais ou menos fixos. Começa-se por definir um horizonte de projecto para a obra, em geral de 40 anos

para a construção civil e de 20 anos para o equipamento, a que se segue o cálculo de estimativas para:

- consumo per capita no horizonte de projecto;
- população no horizonte de projecto;
- factores de ponta.

Destes valores resultam os caudais de dimensionamento do equipamento electromecânico, dos reservatórios e das condutas e acessórios. Decidido um *layout*, com base numa estrutura ramificada a que se fecham mais ou menos arbitrariamente algumas malhas em nome da fiabilidade (raramente quantificada), procede-se ao dimensionamento dos diversos componentes.

O dimensionamento pode ou não recorrer ao uso de algoritmos de minimização de custos e baseia-se no cálculo das condições de equilíbrio hidráulico do sistema para a situação de dimensionamento. Feito o dimensionamento, procede-se a verificações do funcionamento para situações de ocorrência de incêndio e introduzem-se as correcções necessárias.

Neste contexto, a sobrestimação do caudal de dimensionamento era até alguns anos atrás encarada como factor de segurança, pressupondo como consequência negativa apenas o agravamento dos custos, muitas vezes aceite em nome do aumento de fiabilidade. Na realidade, esta visão representa apenas uma vertente do problema, e verifica-se que sistemas sobredimensionados acabam frequentemente por ter maus desempenhos. Em particular, o sobredimensionamento conduz a velocidades de escoamento baixas, e a qualidade da água pode degradar-se significativamente em face dos elevados tempos de retenção ou de percurso que daí resultam.

A metodologia clássica de dimensionamento exigia pouca utilização efectiva das potencialidades da simulação, utilizada apenas para efeitos de verificação das condições de funcionamento em situações limite, vistas de uma perspectiva estritamente hidráulica.

Na prática, raramente se explora de forma eficaz, por exemplo, a melhor localização de reservatórios de percurso ou equilíbrio, e sua combinação com o modo de funcionamento de estações elevatórias, ou o efeito que a localização de reservatórios urbanos pode ter na fiabilidade do sistema de distribuição. A consideração de estudos de consumo de água devidamente fundamentados poderá permitir hoje em dia um melhor conhecimento das solicitações e a redução, por exemplo, dos investimentos iniciais em capacidade de armazenamento pelo ajuste do modo de operação das instalações elevatórias às curvas de consumo.

Finalmente, pouca ou nenhuma utilização efectiva é feita de dados históricos de operação, até porque tipicamente estes dados – quando existem – se encontram dispersos, pouco acessíveis, inconsistentes e organizados de forma demasiada específica, em função do fim primordial a que se destinam, dificultando a partilha de informação. Por exemplo, a existência de dados de medição domiciliária para efeitos de facturação é frequentemente desaproveitada pelos sectores técnicos para cálculos de balanço hídrico ou para o carregamento de modelos. A medição de caudais nos sistemas ainda é, de um modo geral, e como já foi referido anteriormente, muito deficitária.

Factores de mudança

Assiste-se actualmente a um profundo processo de mudança. As principais motivações para tal são as seguintes:

- Começa a reconhecer-se a necessidade de adopção de uma visão integrada e pluridisciplinar da gestão dos sistemas, que contemple nomeadamente os aspectos hidráulicos, de qualidade de água, de fiabilidade, de gestão de energia, de recursos humanos, de operação e manutenção, ambientais e sociais, em articulação com os aspectos económico-financeiros.
- Aumenta a consciencialização da necessidade de garantir bons níveis de serviço durante toda a vida da obra; seja o projecto de sistemas novos, seja o projecto de reabilitação de sistemas existentes, deve ter em vista este aspecto; a identificação e análise dos cenários de operação mais adequados devem ser feita na fase de projecto, o qual deve prever soluções flexíveis, eficientes e eficazes.
- À medida que o nível de cobertura da população aumenta, cada vez mais se constroem expansões ou reforços de sistemas existentes, em vez de sistemas totalmente novos, sendo importante avaliar o impacte das alterações nos sistemas existentes.
- Presta-se hoje em dia uma atenção crescente à necessidade de racionalizar investimentos, sobretudo depois da entrada de investidores privados no sector.
- Existe uma maior consciencialização para os aspectos ambientais, que se reflecte na necessidade de racionalizar o uso dos recursos naturais, em particular da água e da energia.
- As questões relacionadas com a qualidade da água têm cada vez mais relevância técnica e visibilidade pública, e as inerentes exigências legais são cada vez mais específicas.

- O equipamento computacional torna-se cada vez mais acessível e a sua disponibilidade deixa de ser um factor limitativo.
- Após a vulgarização do uso de sistemas de informação, começa a tornar se clara a necessidade de integrar toda esta vasta informação, promovendo a partilha entre sectores e o uso de cada tipo de dados para fins múltiplos.
- O papel do cidadão-consumidor tem vindo progressivamente a ganhar relevância, em particular por meio dos órgãos de comunicação social e das ONG ligadas aos direitos do consumidor e à defesa do ambiente; este facto exige por parte das entidades gestoras a demonstração pública de que procuram em cada momento atingir níveis de qualidade de serviço tão elevados quanto lhes é possível, através de formas de expressão adequadas.

Por todo este conjunto de razões, a forma de elaboração de projectos de sistemas de abastecimento de água tem vindo a evoluir e é inevitável que esta tendência de evolução se mantenha.

6.3.3 Pontos de vista e objectivos a considerar no planeamento e projecto

O planeamento e os projectos de construção de novos sistemas ou de reabilitação de sistemas existentes devem atender, para além da componente económica, onde se consideram tipicamente os custos de investimento e os custos de exploração do sistema (p.ex., custos de energia, de pessoal, de reagentes), outros pontos de vista, como sejam a melhoria do serviço prestado em condições normais de funcionamento, a melhoria da fiabilidade dos sistemas, ou a minimização de perturbações causadas por obras em curso. No Quadro 6.3 listam-se os principais pontos de vista a considerar na fase de planeamento e de projecto, de forma a garantir um bom desempenho, durante toda vida da obra (Alegre *et al*., 2004). Para melhor compreensão sobre os pontos de vista enunciados, analise-se o seguinte raciocínio. Se, por exemplo, não forem cumpridos os requisitos de projecto relativos a tubagens e equipamento, como seja a selecção criteriosa do material das condutas e acessórios, ou a definição das disposições construtivas de assentamento que garantam a estabilidade das condutas, pode estar a pôr-se em causa o bom desempenho da rede não só em termos económico-financeiros, mas também em termos de fiabilidade, perdas de água e qualidade da água. O recurso a modelos de simulação constitui um instrumento de análise fundamental para apoio a uma análise integrada ao longo da vida útil da obra. Detalham-se nos sub-capítulos 6.3.4 e 6.3.5 as

potenciais aplicações dos modelos de simulação nas fases de planeamento e projecto de uma obra.

Quadro 6.3 – Pontos de vista e objectivos a considerar no planeamento e projecto (Alegre *et al*., 2004).

Pontos de vista	Objectivos
Quantidade e pressão de água fornecida aos consumidores	- Garantia de quantidade fornecida em condições normais de consumo e sem falhas relevantes dos elementos da rede - Garantia de pressão em condições normais - Garantia de quantidade e pressão em condições de incêndio
Qualidade da água	- Garantia da qualidade da água
Fiabilidade	- Melhoria da fiabilidade dos componentes individuais do sistema - Melhoria da fiabilidade do sistema para condições normais de funcionamento - Melhoria da fiabilidade do abastecimento em condições de emergência (catástrofes)
Perdas de água	- Controlo de perdas comerciais - Controlo de perdas reais
Danos a terceiros	- Controlo de perturbações causadas por obras programadas - Controlo de perturbações causadas por falhas e obras não programadas
Danos provocados por terceiros	- Minimização do risco de danos provocados por terceiros
Energia	- Minimização do custo de energia - Minimização do consumo de energia
Operação e manutenção	- Aumento da eficiência de operação e manutenção correntes - Flexibilização da gestão da rede
Económico e financeiro	- Garantir a sustentabilidade económico-financeira do sistema
Ambiental	- Minimização de impactes devidos à realização de obras

Pontos de vista	Objectivos
	- Utilização eficiente de recursos hídricos - Utilização eficiente de água potável - Gestão adequada de resíduos (ex. condutas velhas, lamas de ETA, resíduos de obras)

6.3.4 A utilização da modelação no contexto do planeamento

Com o progressivo aumento dos níveis de cobertura da população portuguesa, o planeamento e o projecto de sistemas de abastecimento incidem fundamentalmente na expansão ou renovação de sistemas já existentes (Alegre e Coelho, 1998). A elaboração, actualização sistemática e cumprimento de planos de acção de médio e longo prazo, coerentes com as perspectivas de desenvolvimento da região em o sistema se insere, é fundamental para o cumprimento de níveis de serviço adequados.

A utilização da modelação no contexto do planeamento insere-se principalmente no apoio à elaboração de Planos Directores. O Plano Director deve estar de acordo com o estabelecido nos planos de ordenamento do território, com a caracterização de disponibilidades e de necessidades e com o plano de Investimentos. Trata-se de um documento programático, que deve especificar os objectivos globais, as áreas de intervenção, as exigências de funcionamento, os requisitos gerais que os sistemas devem satisfazer, as metas a atingir em termos de qualidade do serviço, os condicionalismos financeiros existentes e uma estimativa preliminar dos custos e prazos previsíveis de execução (Baptista *et al*., 2000). O planeamento das infra-estruturas deve assentar sobre previsões realistas das necessidades a curto, médio e longo prazo, em situação normal e em situação de emergência (Alegre e Coelho, 1998).

Nesta fase não existe ainda toda a informação de detalhe necessária no contexto do projecto, pelo que se opta em geral pelo uso de modelos simplificados em termos topológicos (p.ex., uma estação elevatória pode ser representada por um reservatório de nível constante), de cenários de consumo e de regras de operação. Na fase de planeamento, a projecção de consumos ao longo da vida útil da obra e a definição da localização e pré-dimensionamento das principais condutas, reservatórios, estações elevatórias e captações, constituem os aspectos mais relevantes.

A complexidade inerente à previsão de consumos em situações normais e em situações extremas pode ser reduzida através do uso de aplicações que permitam a comparação de cenários, como os modelos de simulação. A previsão de consumos não deve ser feita pelo modelador isoladamente, mas este pode ter o papel fundamental ao promover o consenso entre os decisores no processo quanto a projecções futuras de consumo. O sector de planeamento, assim como outros sectores de uma entidade gestora, podem associar informação, proveniente de planos de ordenamento do território, dos recenseamentos populacionais e eleitorais e de análises de tráfego, a projecções populacionais. Estes dados têm que ser manipulados de forma a determinar-se a distribuição espacial dos consumos correspondente nos nós de modelação (ver 4.4.3). A distribuição espacial dos consumos pode ser um factor condicionante na fase de planeamento, uma vez que a problemática da estimativa de consumos pode não residir na evolução dos consumos, mas sim na mobilidade dos consumidores ao longo do tempo para outras zonas da rede ou outros sistemas de abastecimento. A identificação dos factores relevantes que afectam a evolução populacional permite um melhor julgamento sobre como é que os consumos-base podem ser modificados e reutilizados em estudos de planeamento. Técnicas de estimativa de consumos, como a projecção desagregada permitem separar a análise populacional da análise de capitações. No contexto destas técnicas, é possível separar os efeitos do crescimento populacional dos efeitos que influenciam a capitação, como seja neste último caso a adopção de medidas para o uso eficiente da água (Walski *et al*., 2003).

As simulações são usualmente estáticas e construídas para cenários específicos de consumo (p.ex., caudal médio diário, caudal médio diário com caudal de incêndio em pontos-chave, caudal de ponta diário, caudal de ponta instantâneo, caudal mínimo). O caudal mínimo diário correspondente teoricamente à situação de caudal nulo na rede, embora ocorram sempre caudais na rede devido a consumos pontuais, às perdas na rede ou ao enchimento de reservatórios. Os modelos de apoio ao planeamento não são calibrados, uma vez que os sistemas ainda não existem, pelo que o principal objectivo do uso de modelos na fase de planeamento é a exploração de diferentes cenários e o ganho de sensibilidade ao comportamento hidráulico dos sistemas. Os modelos para apoio a projectos de reabilitação de redes devem assentar, sempre que possível, em modelos de simulação calibrados para um determinado cenário-base.

São detalhadas seguidamente algumas das principais utilizações preconizadas para os modelos de simulação na fase de planeamento dos sistemas. Parte dos usos listados já foram abordados no sub-capítulo 5.5, do ponto de vista do cumprimento de critérios de calibração de modelos de redes existentes.

- **Estudo da localização e pré-dimensionamento de instalações especiais (captações, instalações elevatórias, reservatórios), em condições normais**

  A definição da localização destes componentes é responsável pela fixação preliminar das cotas piezométricas disponíveis, em condições normais. Para além do estabelecimento das superfícies piezométrica, importantes também para a minimização do consumo energético e de perdas na rede, a localização das instalações especiais deve ser concebida por forma a garantir a redundância do abastecimento e a evitar configurações de rede longilíneas relativamente à origem, em detrimento de configurações de radiais em torno das origens de abastecimento.

  A escolha dos locais aproximados de captação e da localização e dos volumes aproximados dos órgãos de armazenamento devem ser efectuados de forma a garantir o fornecimento de água com características desejáveis.

  A modelação matemática permite estudar o comportamento do sistema face a cenários alternativos de localização e de capacidade (volume de reservatórios e estimativa da potência das bombas).

- **Estudo da localização e pré-dimensionamento de condutas adutoras e redes de distribuição, em condições normais**

  A implantação das redes (em termos das condutas principais e das manchas de cobertura e não de detalhe de implantação), deve procurar, em primeiro lugar, garantir a cobertura das zonas de consumo e optimizar globalmente o funcionamento do sistema em termos hidráulicos, sanitários e de conservação de energia (Baptista *et al.*, 2000). A modelação matemática permite estudar o comportamento do sistema face a cenários alternativos de traçado e de gamas de diâmetros.

- **Análise e pré-dimensionamento do sistema, em condições de emergência**

  O planeamento dos sistemas deve ter em conta a possibilidade de ocorrência de situações excepcionais, quer ligadas a factores externos à infra-estrutura, que podem condicionar a

disponibilidade de água na origem (em termos de quantidade e/ou qualidade), ou as solicitações ao sistema (consumos excepcionais), quer ligadas a factores internos à infra-estrutura, tais como falhas de elementos importantes que condicionem o fornecimento do serviço.

Estes factores podem dever-se a causas naturais (tais como secas, sismos, inundações gravosas), a actos maliciosos (tais como actos de vandalismo ou terroristas), a acidentes (tais como um contaminação acidental) ou a falhas técnicas (falha de um elemento crítico do sistema).

A modelação matemática permite, ao nível do planeamento, analisar o comportamento simplificado do sistema face a cenários de falha de elementos importantes do sistema em situação de emergência e analisar cenários simplificados alternativos de medidas mitigadoras em termos de alterações da infra-estrutura.

► **Diagnóstico da rede para apoio à reabilitação (inclui análises de expansão de sistemas existentes)**

A reabilitação de redes pode ser motivada pelo estado de degradação de componentes da rede (p.ex., condutas, reservatórios), aumento dos consumos na rede existente, perdas reais elevadas, necessidade de expansão da rede existente, melhoramentos das infra-estruturas vizinhas (p.ex., reconstrução de ruas, redes de drenagem), aumento da flexibilização da gestão da rede e problemas de qualidade da água (Walski *et al*., 2003; Alegre *et al*., 2005).

A maior parte das entidades gestoras não tem capacidade económica, para planear intervenções que obriguem à reabilitação de grandes zonas da rede em simultâneo. O uso de modelos de simulação é fundamental para a identificação dos componentes críticos do sistema a reabilitar e para o estabelecimento de cenários alternativos de reabilitação. A simulação deve ser combinada com informação relativa a roturas de condutas, fugas, problemas de qualidade da água e reclamações de clientes. É importante ter presente que alguns problemas que ocorrem (p.ex., problemas de qualidade da água) podem ter origem externa ao sistema em estudo. Ao nível da reabilitação, os modelos de simulação assumem um papel fundamental na identificação e minimização de problemas que limitem a capacidade hidráulica do sistema (p.ex., aumento excessivo dos consumos, turberculização das tubagens,

dimensionamento inadequado de instalações especiais) ou a qualidade da água entregue aos consumidores.

Na fase de planeamento, a análise da capacidade hidráulica do sistema e a identificação de potenciais problemas pode ser feita a partir de modelos simplificados e não calibrados. A execução de simulações estáticas, para os cenários de maior consumo (p.ex., caudal de ponta instantâneo, caudal médio diário com caudal de incêndio em pontos-chave), permite analisar a distribuição de pressões e identificar troços com maior perda de carga unitária. A análise da capacidade hidráulica também pode ser motivada por valores excessivos de pressão na rede. A análise das pressões máximas deve ser feita para os cenários de baixo consumo.

No caso da reabilitação de condutas para promover o aumento da capacidade hidráulica, o modelo permite simular se é preferível adoptar técnicas de reabilitação não estruturais, como seja a limpeza das condutas (o que implica no modelo uma alteração no factor de rugosidade) ou efectuar substituições pontuais na rede por condutas de maior diâmetro (o que implica no modelo uma alteração de diâmetros). Ao nível da fase de projecto, e na posse de informação de detalhe sobre a topologia, consumos e modos de operação, pode tirar-se partido de simulações hidráulicas e de qualidade da água, em período alargado, para apoio aos projectos de reabilitação.

► **Modularização da rede**

A modularização das redes tem como objectivo a criação de subsistemas interligados, que garantam a redundância de pontos de abastecimento em caso de necessidade, mas que sejam simples de operar e de controlar de forma independente. A macro-modularização de uma rede, ao nível do planeamento, consiste essencialmente em definir tipologias de traçado de redes que permitam a separação da componente de adução da componente de distribuição, e em prever, de uma forma sistemática mas ainda sem recurso ao detalhe, os sectores de distribuição. Estes poderão, por exemplo, e quando as diferenças de cotas topográficas o justificarem, ser condicionados pelo estabelecimento de andares de pressão. As zonas de pressão devem ser planeadas através do compromisso entre o número de zonas e as pressões a garantir em cada uma destas. Tipicamente, a diferença entre zonas de pressão varia entre 20 e 40 m c.a. (Walski *et al.*, 2004).

A modelação permite, através da simulação de cenários de consumos de ponta e mínimos, obter as envolventes de pressão nos vários pontos da rede, importantes para o planeamento das zonas de pressão (Alegre e Coelho, 1998; Alegre *et al.*, 2005).

- **Análise do consumo energético**

  A par com o controlo activo das perdas de água, a minimização do consumo de energia para além do estritamente necessário à satisfação das necessidades dos consumidores constitui uma medida fundamental para que a operação seja eficiente e racional em termos económicos e ambientais (Alegre e Coelho, 1998).

  As aplicações dos modelos com vista ao cumprimento deste objectivo ao nível do planeamento, prende-se com a definição do esquema altimétrico dos vários componentes dos sistema e com a estimativa da potência associada às estações elevatórias. A estimativa de custos associados aos consumos energéticos poder ser efectuada através de simulações estáticas, para cenários de consumos médios.

No Quadro 6.4 relaciona-se cada utilização do modelo de simulação com os pontos de vista a atender e a cumprir na fase de planeamento, indicando também o tipo de simulação mais adequada. Destes pontos de vista, a mitigação dos danos a terceiros e dos danos provocados por terceiros, e a minimização de impactes ambientais negativos requerem medidas no âmbito do planeamento, projecto e construção que transcendem a simulação. Os restantes pontos de vista podem ser directamente analisados com o apoio de modelos de simulação.

Quadro 6.4 – A utilização dos modelos face aos pontos de vista a considerar na fase de planeamento

Utilização do modelo	Tipo de simulação	Garantia de quantidade fornecida em condições normais de consumo e sem falhas dos elementos da rede	Garantia de pressão em condições normais	Garantia de quantidade e pressão em condições de incêndio	Garantia da qualidade da água	Melhoria da fiabilidade dos componentes individuais do sistema	Melhoria da fiabilidade do sistema para condições normais de funcionamento	Melhoria da fiabilidade do abastecimento em condições de emergência	Controlo de perdas comerciais	Controlo de perdas reais	Controlo de perturbações causadas por obras programadas	Controlo de perturbações causadas por falhas e obras não programadas	Minimização do risco de danos provocados por terceiros	Minimização do custo de energia	Minimização do consumo de energia	Aumento da eficiência de operação e manutenção correntes	Flexibilização da gestão da rede	Garantir a sustentabilidade económico-financeira do sistema	Minimização de impactes devidos à realização de obras	Utilização eficiente de recursos hídricos	Utilização eficiente de água potável	Gestão adequada de resíduos
Estudo da localização e pré-dimensionamento de instalações especiais, em condições normais	E	⊙	⊙				⊙			⊙	⊙		⊙		⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
Estudo da localização e pré-dimensionamento de condutas adutoras e redes de distribuição, em condições normais	E	⊙	⊙				⊙				⊙		⊙		⊙		⊙	⊙	⊙		⊙	
Análise e pré-dimensionamento do sistema, em condições de emergência	E							⊙				⊙					⊙	⊙	⊙			
Diagnóstico da rede para apoio à reabilitação	E	⊙	⊙				⊙			⊙					⊙		⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
Modularização da rede	E	⊙	⊙				⊙			⊙					⊙	⊙	⊙	⊙			⊙	
Análise do consumo energético	E	⊙	⊙			⊙	⊙								⊙		⊙	⊙			⊙	

E – Simulação estática
⊙ – Ponto de vista a atender na fase de planeamento

6.3.5 A utilização da modelação no contexto do projecto

A utilização da modelação no contexto do projecto insere-se principalmente no apoio ao dimensionamento de novas redes e à reabilitação (incluindo expansão) de redes existentes. Requer, em

geral, modelos consideravelmente mais detalhados e completos do que no planeamento.

Algumas das datas de referência na vida da obra usualmente analisadas no âmbito do projecto são as seguintes:

- início de projecto;
- horizonte de projecto;
- fim de concessão;
- fim de vida útil dos equipamentos electromecânicos;
- ocorrência de alterações relevantes ao nível dos planos de ordenamento do território.

Para cada uma das datas de referência, e em função do tipo de utilização do modelo, estabelecem-se os cenários relevantes a analisar, incluindo o tipo de simulação e o cenário de consumos na rede:

- simulação estática (p.ex., caudal médio diário, caudal médio diário com caudal de incêndio em pontos-chave, caudal de ponta diário, caudal de ponta instantâneo, caudal mínimo);
- simulação dinâmica (p.ex., dia de consumo médio, dia de maior consumo).

A simulação estática para os diferentes cenários de consumo é o tipo de simulação mais utilizado em projecto. No entanto, o dimensionamento dos vários componentes deve atender também à análise do comportamento operacional da rede, a qual requer a execução de simulações em período alargado. A análise do comportamento diário da rede requer a introdução de padrões de variação do consumo ao longo do tempo (ver 4.4.3 - “Padrões temporais de consumo – simulação em período alargado”).

O projecto de um novo sistema ou de expansões do sistema existente deve ser baseado numa estimativa das solicitações a satisfazer – e sua distribuição espacial – tão rigorosa quanto possível, incluindo consumo humano (residencial, público, comercial, industrial), caudais de rega de espaços verdes, lavagem de ruas, combate a incêndio e caudais perdidos por fugas. A caracterização das necessidades ao longo da vida útil da obra a projectar deve incluir uma previsão da evolução dos consumos médios. Um dos desafios que se colocam actualmente na previsão de consumos, relaciona-se com o estudo dos efeitos de medidas para o uso eficiente da água nos critérios de dimensionamento (Cesário, 1995; INAG, 2001).

Na fase de dimensionamento não é possível obter medições de caudais da rede de projecto, pelo que os padrões de consumo

devem ser estimados com base em diagramas-tipo de sistemas com características semelhantes. A disponibilidade, na bibliografia e junto das entidades gestoras, de padrões de consumo devidamente caracterizados é ainda muito reduzida, o que condiciona significativamente a qualidade da informação obtida a partir de simulações em período alargado, na fase de projecto.

A duração de uma simulação em período alargado depende dos objectivos pretendidos. Se o objectivo for a especificação de modos de operação de equipamentos manobráveis, para o qual é necessário analisar-se o comportamento hidráulico da rede, nomeadamente os ciclos de enchimento e esvaziamento dos reservatórios, a duração da simulação é da ordem de alguns dias. Se o objectivo for a modelação de um desinfectante residual, para o qual é necessário que o sistema atinja o equilíbrio em termos do parâmetro de qualidade da água, a duração da simulação é da ordem de dias a semanas. Se o objectivo da simulação for a estimativa do consumo energético, pode haver interesse em executar simulações com duração superior (p.ex., meses).

Os modelos de apoio ao projecto não são obviamente calibráveis – uma vez que os sistemas ainda não existem – pelo que o principal objectivo do uso de modelos na fase de projecto é a exploração de diferentes cenários e o ganho de sensibilidade ao comportamento hidráulico dos sistemas. Os modelos para apoio a projectos de reabilitação de redes devem assentar em modelos de simulação calibrados para um determinado cenário-base.

Os principais tipos de utilização da modelação no contexto do projecto são as seguintes:

► **Dimensionamento das instalações especiais (captações, instalações elevatórias, reservatórios), em condições normais de funcionamento**

  No caso de reservatórios, é importante verificar se a sua localização garante as pressões mínimas e máximas requeridas (p.ex., simulação estática para o caudal de ponta instantâneo no ano horizonte de projecto e para o caudal mínimo instantâneo no ano início de projecto) e se minimiza as flutuações diárias de pressão na rede (p.ex., simulação para período alargado para o dia de maior consumo no ano horizonte de projecto), com particular atenção para os pontos críticos da rede (p.ex., pontos altos/baixos, pontos de extremidade da rede).

  Simulações em período alargado permitem também avaliar os ciclos de enchimento e esvaziamento, ou no caso de estações elevatórias, estimar a duração dos ciclos, conhecer os pontos de

funcionamento e estimar os custos de energia. Por exemplo, no caso dos reservatórios, uma simulação para o dia de consumo máximo, deve ter uma duração de pelo menos 48 horas para analisar a capacidade de recuperação do volume armazenado.

A mistura e o envelhecimento da água no interior dos reservatórios afectam a qualidade da água, sendo o envelhecimento da água usualmente o parâmetro determinante (Walski *et al*., 2003).

No caso das captações e das instalações elevatórias, a modelação pode ajudar ao dimensionamento dos grupos electrobomba. Numa fase inicial da modelação, quando ainda não se conhecem as curvas características das bombas, estas podem ser modeladas como um reservatório de nível fixo. O modelador deve possuir um bom conhecimento sobre o modo de operação de uma bomba, de forma a poder dimensioná-la correctamente. Os dados essenciais para a modelação de sistemas elevatórios (ver 4.3.9) são as curvas características das bombas, as características do sistema no qual operam e o modo com estas são operadas. O modo de operação de sistemas elevatórios pode ser variado, nomeadamente a conduta de aspiração pode estar ligada a uma conduta da rede, a um reservatório ou furo, a elevação de caudal pode ser feita directamente para a rede ou para um reservatório, com recurso a bombas de velocidade fixa ou variável.

No caso das estações elevatórias, os principais problemas colocam-se em termos da sobrepressurização da rede durante períodos de baixo consumo e nos elevados custos energéticos que podem ocorrer em consequência destas poderem funcionar durante uma parte significativa do tempo em pontos de operação ineficientes. Após a selecção da curva da bomba, devem analisar-se as pressões no sistema e os pontos de operação da bomba (com vista à estimativa dos custos energéticos durante a exploração), recorrendo a múltiplas simulações estáticas ou a simulações em período alargado para diferentes cenários de consumo.

► **Dimensionamento de condutas adutoras e elementos acessórios, em condições normais de funcionamento**

No dimensionamento de condutas adutoras, é necessário garantir que a sua capacidade de transporte é suficiente para a função pretendida (sendo o cenário de funcionamento crítico o de maior consumo no horizonte de projecto), que a pressão mínima requerida não é violada em nenhum ponto do traçado

(sendo também neste caso o cenário de maior consumo no horizonte de projecto o mais relevante). O Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais refere que o sistema adutor é geralmente dimensionado para o caudal do dia de maior consumo, devendo a capacidade do reservatório ser calculada para cobrir as flutuações horárias, ao longo do dia. É importante garantir também que classe de pressão escolhida é adequada às pressões máximas atingidas, sendo neste caso os cenários críticos os de menores caudais transportados.

Para efeitos de verificação de pressões, a simulação estática é suficiente. Para a verificação da capacidade de transporte já se justifica o uso de simulação dinâmica. Só deste modo será possível analisar o funcionamento integrado dos reservatórios, das instalações elevatórias e das adutoras, atendendo aos diferentes padrões de consumo em causa.

Para além dos referidos aspectos hidráulicos, o dimensionamento de condutas adutoras deve ainda atender aos aspectos de qualidade da água. Deste ponto de vista, é necessário garantir que os tempos de percurso não são excessivamente elevados, ponto em risco a qualidade da água transportada (neste caso interessa analisar os cenários de menores consumo no início de exploração, com base em simulação dinâmica). Este tipo de simulação permite relacionar as concentrações de cloro com a velocidade de escoamento (ver tópico abaixo sobre "Modelação de um desinfectante residual"), sendo uma fonte de informação decisiva para o planeamento de futuros pontos de recloragem ao longo da rede.

- **Dimensionamento de redes de distribuição e elementos acessórios, em condições normais de funcionamento**

O dimensionamento de sistemas de distribuição de água tem com principais objectivos, do ponto de vista hidráulico, a garantia de fornecimento dos consumos previsíveis, em condições de conforto hidráulico, minimizando os custos de energia e as perdas de água na rede. Do ponto de vista de qualidade da água, a rede deve ser dimensionada de forma a garantir o seu fornecimento em condições sanitárias adequadas e a minimizar a necessidade de pontos de recloragem ou de descargas periódicas.

Um sistema de distribuição deve ser definido tendo em conta a topografia local, privilegiando a adopção de redes com esquemas de operação flexíveis (i.e., com possibilidade de

funcionamento como sistemas emalhadas ou ramificados para os diferentes cenários operacionais), de forma a aumentar a sua fiabilidade e a minimizar as zonas de estagnação. O controlo das pressões máximas e mínimas que ocorrem na rede pode ser efectuado através de simulações estáticas para os cenários mais desfavoráveis, nomeadamente para o cenário de caudais mínimos e para o cenário de caudal de ponta instantâneo no ano horizonte de projecto (ver 6.3.6), respectivamente. Para se analisar as flutuações diárias de pressão devem efectuar-se simulações dinâmicas para os cenários de maior consumo (p.ex., dia de maior consumo no ano horizonte de projecto).

O projecto deve prever meios que permitam o controlo activo de perdas de água na fase posterior de operação e manutenção, nomeadamente através da estruturação modular da rede. A análise da variação diária de pressões (p.ex., no ano início e horizonte de projecto) permite apoiar na definição de zonas de pressão e no dimensionamento de válvulas redutoras de pressão (ver tópico sobre "Modularização da rede"), assim como no diagnóstico de problemas de pressão em redes de distribuição existentes (ver tópico abaixo sobre "Diagnóstico da rede para apoio à reabilitação de sistemas de distribuição"). Para a verificação da capacidade de transporte já se justifica o uso de simulação dinâmica. Só deste modo será possível analisar o funcionamento integrado dos reservatórios, das instalações elevatórias e da rede de distribuição, atendendo aos diferentes padrões de consumo em causa.

Para além dos referidos aspectos hidráulicos, o dimensionamento da rede de distribuição deve ainda atender aos aspectos de qualidade da água. A análise da capacidade de transporte, em conjunto com a simulação do tempo de percurso (ver tópico sobre "Modelação de um desinfectante residual"), para os cenários de baixo consumo, permite analisar os efeitos do sobredimensionamento da rede na qualidade da água. Uma das formas de aumentar a velocidade do escoamento em troços críticos da rede, em particular para os iniciais de projecto, pode ser através do fechamento de algumas válvulas, reduzindo a redundância e aumentando a velocidade.

► **Análise e dimensionamento do sistema para situações de combate a incêndio**

A análise do sistema em condições de incêndio tem como objectivo determinar a capacidade hidráulica para garantir o caudal requerido para combate a incêndio (em função do grau

de risco da zona), em determinados nós da rede, e caso seja necessário, introduzir os necessários melhoramentos para a garantia de quantidade e pressão nestas condições.

O estudo da capacidade hidráulica de uma rede de distribuição, em condições de incêndio, pode ser efectuado através de simulações estáticas (p.ex., caudal de ponta diário com caudal de incêndio em pontos-chave, caudal médio diário com caudal de incêndio em pontos-chave).

Em sistemas de grande dimensão, com grande capacidade de armazenamento ou com reservatórios redundantes, a duração do incêndio não é um factor crítico na modelação. Em pequenos sistemas, ou no dimensionamento de novos reservatórios, a duração é importante, pois condiciona a capacidade de armazenamento dos reservatórios.

O modelo pode apoiar numa análise integrada da capacidade hidráulica do sistema (i.e., condutas e reservatórios) face a um cenário de incêndio com uma determinada duração, contemplando o uso simultâneo de múltiplos hidrantes (p.ex., mais do que um foco de incêndio). A simulação em período alargado permite também estimar o tempo de restabelecimento das condições normais de funcionamento no sistema e definir esquemas operacionais que minimizem este tempo. A modelação do caudal para combate a incêndio encontra-se descrita em 6.3.8.

- **Análise e dimensionamento do sistema em condições de emergência**

A verificação do comportamento do sistema em condições de emergência é importante para identificar os componentes críticos do sistema (i.e., estações de tratamento, furos, reservatórios, estações elevatórias, condutas principais), aumentar a flexibilização da gestão da rede, minimizando falhas no abastecimento à população, quer em termos quantitativos quer em termos qualitativos, e o tempo necessário para a rede restabelecer as condições normais de funcionamento.

A modelação matemática permite, ao nível do projecto, analisar o comportamento do sistema face a cenários de falha de elementos importantes do sistema em situação de emergência e analisar cenários alternativos de medidas mitigadoras, em termos de alterações da infra-estrutura e de modos de operação. A análise de cenários requer a identificação do componente do sistema candidato a falha e do respectivo cenário de consumos. A verificação da redistribuição de

pressões no sistema, em consequência da falha de um componente, pode ser feita através da análise simulações estáticas. O modo como a rede deve ser operada (i.e., níveis nos reservatórios, estado das bombas e válvulas), o tempo necessário para o restabelecimento das condições normais de funcionamento ou o tempo de propagação de um contaminante devem ser estimados através de simulações em período alargado.

A análise do comportamento da rede em condições de emergência é também importante para a definição de planos de contingência, e permite preparar os operadores para reagirem a um cenário real desta natureza.

► **Diagnóstico da rede para apoio à reabilitação (inclui análises de expansão de sistemas existentes)**

Ao nível do projecto, é possível utilizar o modelo para fazer um diagnóstico detalhado dos problemas na rede e estabelecer cenários alternativos de reabilitação. Uma vez que a rede já existe, a análise de cenários de reabilitação deve ser feita com base em modelos calibrados para um determinado cenário-base.

A análise da de problemas de capacidade hidráulica limitada pode ser complementada com simulações em período alargado, para os cenários de maior consumo. O diagnóstico da rede e o estabelecimento de cenários alternativos de reabilitação com vista à melhoria da qualidade da água entregue aos consumidores, podem ser feitos através da simulação da variação do tempo de percurso na rede (ver tópico sobre "Modelação de um desinfectante residual", abaixo).

► **Especificação de modos de operação de equipamentos manobráveis**

A crescente complexidade da gestão de sistemas de abastecimento de água requer a introdução de equipamentos manobráveis que confiram flexibilidade de operação, permitindo em cada momento ajustar o modo de funcionamento à disponibilidade de recursos e às necessidades dos consumidores, com elevado grau de eficiência. Hoje em dia há uma utilização crescente de válvulas telecomandadas, ou comandadas localmente com autómatos, que permitem alterar os circuitos da água ou ajustar pressões ou caudais, contribuindo para melhorar os níveis de serviço ou para melhorar a eficiência em termos de perdas de água ou consumo

de energia. A localização e a operação destes elementos devem ser previstas na fase de projecto, com apoio sistemático de modelos de simulação. A instalação destes equipamentos será eventualmente faseada, mas as caixas onde irão ser colocados deverão ser previstas e construídas desde início, pois de contrário os custos marginais (directos, ambientais e sociais) são muito mais elevados (Alegre e Coelho, 1998). A análise de diferentes cenários de operação, requer a caracterização das respectivas regras operacionais no modelo e a execução de simulações em período alargado.

► **Modularização da rede**

Na fase de projecto, a modularização da rede (tópico abordado em 6.3.4) corresponde à definição detalhada do limite das zonas de pressão, ao planeamento das zonas de medição e controlo (ZMC) e ao dimensionamento e implantação de equipamento de medida e controlo (p.ex., medidores de caudal, válvulas redutoras de pressão). A definição de zonas de pressão e o dimensionamento de válvulas redutoras de pressão devem ser feitos atendendo a diferentes cenários de consumos (i.e., condições normais e de incêndio), ao longo da vida útil da obra.

Embora a simulação estática permita analisar adequadamente as pressões máximas e mínimas na rede, a execução de simulações dinâmicas permite analisar os efeitos da sectorização nas flutuações diárias de pressão e na capacidade hidráulica do sistema, para cada cenário de consumos. Se existir apenas um pequeno número de clientes com pressões excessivas, uma solução alternativa pode ser a instalação de válvulas redutoras de pressão individuais.

A definição dos limites de uma ZMC obriga à execução de simulações de detalhe (i.e., tipologia, consumos e controlos correctamente estimados), para os cenários de consumo em condições normais e de incêndio (Alegre *et al*. (2005). A definição de zonas de pressão e de ZMCs deve ser efectuada minimizando a ocorrência de extremos da rede com caudal reduzido.

► **Análise do consumo energético**

As aplicações dos modelos com vista ao cumprimento deste objectivo ao nível do projecto, prende-se com a selecção adequada do equipamento e dos modos de operação. O dimensionamento e selecção do equipamento de elevação deve permitir ajustar a capacidade de bombeamento às necessidades de cada momento, procurando garantir que os equipamentos se

mantenham próximos dos pontos de funcionamento óptimos e com as alturas de elevação necessárias e suficientes.

O recurso à simulação matemática ou mesmo a módulos de cálculo destinados especificamente à optimização de energia permite estabelecer, para os cenários mais prováveis de procura e de disponibilidade de água, quais os modos de operação a adoptar preferencialmente. Este tipo de análise, beneficia largamente da simulação em período alargado para diferentes cenários operacionais e de consumo.

- **Modelação de qualidade da água**

Ao nível do projecto, o tempo de percurso constitui o principal parâmetro de qualidade da água de interesse resultante da modelação. O tempo de percurso é uma variável que depende apenas das características hidráulicas da rede e não requer a introdução de parâmetros adicionais (ver 6.2.2). Permite obter o tempo médio de permanência da água na rede e identificar os locais onde a água permanece mais tempo. Por oposição, a modelação de parâmetros químicos, como seja o cloro residual (ver 6.2.4), requer, para além do valor da constante de decaimento no seio do escoamento da água entrada no sistema (Vieira *et al*., 2001), um conhecimento sobre a forma como este composto decai ao longo da rede, o que não é possível de se conhecer na fase de projecto. Longos tempos de retenção em reservatórios conduzem a uma redução significativa nos níveis de cloro residual, promovendo o crescimento microbiológico.

Um objectivo implícito do dimensionamento, e posteriormente da operação, de reservatórios é a minimização do tempo de retenção nesta estruturas de armazenamento e da permanência de parcelas de água no seu interior por longos períodos de tempo. Grande parte das aplicações de simulação existentes permitem ao utilizador especificar e testar modelos de mistura nos reservatórios, em função das opções de dimensionamento e dos padrões de enchimento/esvaziamento que ocorrem no interior dos reservatórios, e assim analisar o impacte destes na qualidade da água que chega à rede de distribuição ao longo de uma simulação em período alargado.

A maioria das aplicações de simulação existentes recorre a modelos de sistema (*black-box models* ou *input-output models*) para simular os processos que ocorrem no interior dos reservatórios e não permite simular o movimento da água dentro de um reservatório. No caso das redes de distribuição, critérios de projecto como sejam a consideração de um diâmetro mínimo

ou a criação de malhas devem ser analisados do ponto de vista do seu impacte ao nível dos tempos de percurso. Este tipo de análise deve ser efectuada para os cenários mais desfavoráveis do ponto de vista de qualidade da água (p.ex., simulação dinâmica para um cenário de consumo médio diário no ano inicio do projecto, com particular atenção para as horas de menor consumo do dia). Uma solução possível para aumentar o tempo de percurso nas condutas consiste em diminuir o número de ligações redundantes. Esta solução opõe-se, aparentemente, à noção de criação de malhas para aumentar a fiabilidade nas redes de distribuição. Na realidade a diminuição da redundância numa rede de distribuição pode ser conseguida fechando válvulas estratégicas da rede durante a operação diária da rede. O fecho de válvulas deve procurar minimizar a criação de extremos de rede com caudais reduzidos. Em caso de necessidade, essas válvulas abrem-se para responder a situações anormais, ou a aumentos de consumo. Estes tipos de simulação permitem também planear a localização de pontos de recloragem na rede.

No Quadro 6.5 relaciona-se cada utilização do modelo de simulação com os pontos de vista a atender e a cumprir na fase de projecto, indicando também o tipo de simulação mais adequada. Destes pontos de vista, a mitigação dos danos a terceiros, e de danos provocados por terceiros e a minimização de impactes ambientais negativos requerem medidas no âmbito do planeamento, projecto e construção que transcendem a simulação. Os restantes pontos de vista podem ser directamente analisados com o apoio de modelos de simulação.

Quadro 6.5 – A utilização dos modelos face aos pontos de vista a considerar na fase de projecto

Utilização do modelo	Tipo de simulação	Garantia de quantidade fornecida em condições normais de consumo e sem falhas dos elementos da rede	Garantia de pressão em condições normais	Garantia de quantidade e pressão em condições de incêndio	Garantia da qualidade da água	Melhoria da fiabilidade dos componentes individuais do sistema	Melhoria da fiabilidade do sistema para condições normais de funcionamento	Melhoria da fiabilidade do abastecimento em condições de emergência	Controlo de perdas comerciais	Controlo de perdas reais	Controlo de perturbações causadas por obras programadas	Controlo de perturbações causadas por falhas e obras não programadas	Minimização do risco de danos provocados por terceiros	Minimização do custo de energia	Minimização do consumo de energia	Aumento da eficiência de operação e manutenção correntes	Flexibilização da gestão da rede	Garantir a sustentabilidade económico-financeira do sistema	Minimização de impactes devidos à realização de obras	Utilização eficiente de recursos hídricos	Utilização eficiente de água potável	Gestão adequada de resíduos
Dimensionamento de instalações especiais, em condições normais	E SPA	✱	✱		✱		✱			✱				✱		✱		✱			✱	
Dimensionamento de condutas adutoras e elementos acessórios, em condições normais	E SPA	✱	✱		✱		✱			✱				✱	✱		✱	✱			✱	
Dimensionamento de redes de distribuição e elementos acessórios, em condições normais de funcionamento	E SPA	✱	✱		✱		✱			✱				✱	✱		✱	✱			✱	
Análise e dimensionamento do sistema, em condições de incêndio	E SPA			✱			✱										✱					
Análise e dimensionamento do sistema, em condições de emergência	E SPA				✱			✱				✱					✱	✱	✱			
Diagnóstico da rede para apoio à reabilitação																						
Especificação de modos de operação de equipamentos manobráveis	SPA	✱	✱		✱		✱							✱			✱	✱			✱	
Modularização da rede	E SPA	✱	✱		✱		✱		✱	✱					✱	✱	✱	✱			✱	
Análise do consumo energético	SPA	✱	✱											✱			✱	✱			✱	
Modelação de qualidade da água	SPA				✱												✱	✱				

E – Simulação estática
SPA – Simulação em período alargado
✱ - Ponto de vista a atender na fase de projecto

6.3.6 Parâmetros de projecto

6.3.6.1 Requisitos regulamentares relativos a pressão

Num sistema de distribuição, as pressões em todos os nós da rede devem estar compreendidas entre um valor máximo e um valor mínimo admissíveis e a superfície piezométrica não deve estar sujeita a variações excessivas ao longo do tempo.

O Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais estabelece que a pressão máxima (estática ou de serviço), em qualquer ponto de utilização, não deve ultrapassar os 600 kPa, medida ao nível do solo. O valor máximo de pressão deve ser estabelecido atendendo à resistência estrutural das condutas e acessórios da rede (assim como de equipamentos domésticos), à garantia de conforto de utilização, à limitação de fugas de água e à minimização de custos energéticos (Alegre, 1992; Boulos *et al.*1992).

O regulamento refere ainda que a pressão de serviço em qualquer dispositivo de utilização predial, para o caudal de ponta, não deve ser, em regra, inferior a 100 kPa. Deste modo, a pressão mínima, na rede pública e ao nível do arruamento pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$H = 100 + 40 \cdot n \tag{17}$$

onde H é a pressão mínima (kPa) e *n* o número de pisos acima do solo, incluindo o piso térreo.

O limite mínimo de pressão depende das restrições impostas em cada ponto da rede e deve ser estabelecido de modo a evitar sub-pressões na rede, indesejáveis por facilitarem a contaminação de origem externa e a garantir o abastecimento de consumidores (Alegre, 1992). A fixação da pressão mínima deve atender a factores diversos, como sejam as características das condutas e acessórios da rede e a existência de sobrepressoras prediais.

As flutuações excessivas da superfície piezométrica são indesejáveis por afectarem o conforto dos consumidores e por estarem associadas a grande sensibilidade do sistema de distribuição a pequenas alterações conjunturais. O Regulamento geral dos sistemas públicos e prediais de distribuição de água e drenagem de águas residuais refere que não é aceitável grande flutuação de pressões em cada nó do sistema, impondo-se uma variação máxima ao longo do dia de 300 kPa. As flutuações da superfície piezométrica estão geralmente associadas às velocidades de escoamento nas condutas, dada a relação

aproximadamente quadrática entre velocidades e perdas de carga. O critério de dimensionamento mais correntemente utilizado pelos projectistas portugueses baseia-se na limitação de velocidades, onde se admite que um sistema que não apresente velocidades "excessivas" terá um bom desempenho hidráulico (Alegre, 1992).

6.3.6.2 Requisitos regulamentares relativos a defesa contra incêndio

Em situação de incêndio, o regulamento não exige qualquer limitação de velocidades nas condutas e admite-se que possam ocorrer alturas piezométricas inferiores a 100 kPa. É importante verificar o cumprimento do requisito de pressão mínima não só no hidrante, mas também no resto do sistema. A modelação do caudal para combate a incêndio encontra-se descrita em 6.3.8.

A verificação dos caudais de incêndio deve ser feita pelo menos nos hidrantes mais desfavoráveis da rede. Actualmente, existem simuladores que permitem verificar automaticamente as restrições de caudal e de pressão impostas em todos os nós do sistema.

A fixação de um valor mínimo de pressão nos restantes nós deve atender à fiabilidade das cotas de terreno. Se não for satisfeita a pressão requerida no nó do hidrante ou se ocorrerem pressões negativas na rede, devem ser tomadas medidas para melhoramento das pressões, nomeadamente a substituição de condutas.

Na Figura 6.19 ilustra-se a variação de pressão em três nós de uma rede, ao longo de uma simulação em período alargado, com duração de 48 horas. A pressão mínima requerida nos três nós da rede é de 300 kPa (n = 5 pisos). Verifica-se que no nó 38, as pressões são adequadas; no nó 291, as flutuações de pressão em determinados períodos do dia são excessivas, não verificando a pressão mínima requerida nesses períodos; e no nó 297 existe um problema generalizado de pressões mínimas insuficientes ao longo do dia.

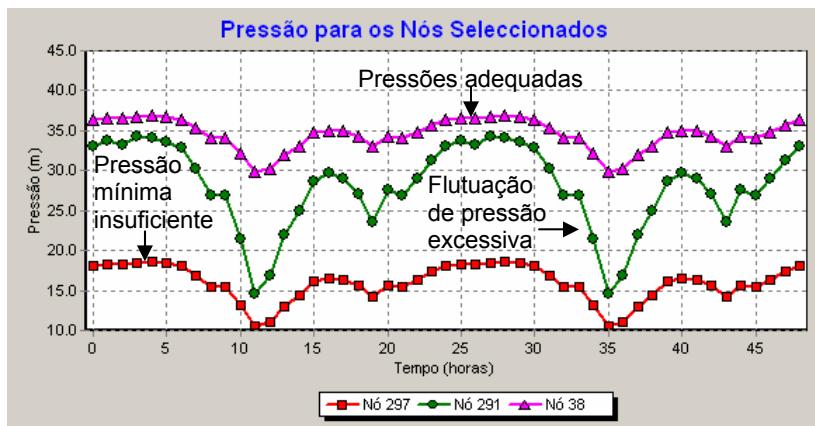



Figura 6.19 – Variação da pressão ao longo de 48 horas de simulação em três pontos de uma rede.

6.3.6.3 Requisitos regulamentares relativos a velocidade de escoamento nas condutas

O regulamento estabelece que a velocidade de escoamento para o caudal de ponta no ano horizonte de projecto não deve exceder o valor calculado de acordo com a seguinte equação:

$$V_{máx} = 0{,}127 D^{0{,}4} \quad (18)$$

A velocidade de escoamento para o caudal de ponta no ano início de exploração do sistema não deve ser inferior a 0,3 m/s, devendo-se prever dispositivos adequados para descarga periódica nas condutas onde não seja possível verificar-se este limite.

A velocidade e a perda de carga numa conduta relacionam-se, uma vez que a perda de carga é função da velocidade do escoamento.

6.3.6.4 Limitação da perda de carga unitária

A perda de carga unitária é uma grandeza geralmente calculada pelos simuladores. Ao especificar-se a máxima perda de carga que pode ocorrer num dado cenário, é possível avaliar, em conjunto com a velocidade máxima, a capacidade hidráulica das condutas na rede.

Não existem actualmente requisitos regulamentares relativamente a esta matéria. Alegre (1992) refere que, como ordem de grandeza, valores de perda de carga unitária compreendidos entre 2 e 4 são razoáveis para dimensionar a generalidade dos sistemas de distribuição. Nos grandes sistemas, ou em rede longas, pode ser

necessário reduzir este valor para 1, ou até menos. Para pequenos sistemas, em que a rede se desenvolva por área arredondada em torno do ponto de abastecimento, poder-se-ão usar valores da ordem de 5 ou 6 m/km, ou até mais se as velocidades nas condutas não ultrapassarem os limites relativos de segurança ao choque hidráulico. A estimativa da perda de carga máxima numa rede pode ser efectuada admitindo um valor máximo de perda de carga entre cada nó e a origem de abastecimento (Alegre, 1992 aponta para valores de referência inferiores a 10 ou 15 m) e medindo a extensão do percurso correspondente ao nó mais afastado.

6.3.6.5 Limitação do tempo de percurso

O tempo de percurso (TP) é uma forma simples de controlar a degradação da qualidade da água que circula na rede.

Os responsáveis pela qualidade da água na entidade gestora para a qual se está a fazer o dimensionamento deverão ser capazes de exprimir um objectivo em termos de TP máximo a respeitar na rede.

A rede a dimensionar deverá procurar a minimização do TP, ou pelo menos que este não ultrapasse o tal valor máximo, verificando os ciclos diários para as situações de caudais mais desfavoráveis (horas de menor consumo, nos extremos de rede, no início de projecto).

Muitas vezes é possível introduzir melhorias no TP obrigando a água a circular mais, ou seja, diminuindo o número de ligações redundantes. Isto traz à evidência o conflito entre o desejo de ter muitas ligações redundantes (muitas malhas) para aumentar a fiabilidade, e a necessidade de manter o TP em valores mais baixos. A solução passa por criar a redundância física pretendida através da introdução de malhas efectivas, mas fechar válvulas na operação diária para deixar em funcionamento apenas uma rede ramificada. Em caso de necessidade, essas válvulas abrem-se para responder a situações anormais, ou quando o consumo crescer suficientemente.

6.3.7 Métodos de dimensionamento

6.3.7.1 Objectivo

O objectivo global dos modelos de dimensionamento consiste em dimensionar de forma integrada as condutas, válvulas, bombas e reservatórios por forma a cumprir os pontos de vista enunciados em

6.3.3., incluindo naturalmente o de minimizar os custos globais do sistema, ao longo da vida da obra.

6.3.7.2 Enquadramento

Apesar do intenso trabalho de investigação, o uso de modelos de optimização para apoio ao dimensionamento dos sistemas não se encontra ainda generalizado na prática corrente de engenharia. Os principais aspectos que contribuem para este facto prendem-se com a disponibilidade de aplicações amigáveis nesta área, mas sobretudo com a dificuldade dos modelos de optimização em incorporarem todas as variáveis relevantes num processo de dimensionamento ou de reabilitação (ver 6.3.3). Contudo, o uso de modelos de optimização não deve ser visto como um processo segundo o qual apenas uma única solução é encontrada, mas como um processo onde são analisados os custos e os benefícios de vários cenários alternativos.

A maior parte dos algoritmos de optimização existentes atende apenas a aspectos relativos à satisfação dos consumos e pressões na rede. Há também desenvolvimentos relevantes no domínio da fiabilidade (Lansey *et al.*, 2004). Recentemente tem havido alguma evolução no sentido de permitir a incorporação de objectivos de desempenho diversos nos algoritmos de optimização (Farmani *et al.*, 2005, Savic e Walters, 1997).

Por esta razão, uma via alternativa consiste na combinação do uso de modelos de simulação (i.e., simulação estática e simulação em período alargado) com algoritmos de pré-dimensionamento, mantendo com pilar principal a competência dos projectistas conferida pela experiência profissional, capacidade crítica e bom-senso.

6.3.7.3 Modelos de pré-dimensionamento

De modo simplificado, os modelos de pré-dimensionamento podem classificar-se em:

- Modelos heurísticos;
- Modelos de optimização.

Referem-se pela sua simplicidade conceptual e facilidade de aplicação dois modelos heurísticos (Alegre, 1992):

- Modelo de pré-dimensionamento baseado no critério de velocidades máximas;
- Modelo de pré-dimensionamento baseado no critério do gradiente hidráulico máximo.

Ambos requerem a definição prévia de toda a topologia em termos de localização e características dos reservatórios, instalações elevatórias e válvulas de controlo, assim como a localização e o modo de ligação dos troços de conduta.

6.3.7.3.1 Critério de velocidades máximas

Este critério tem como objectivo principal a determinação de uma colecção de diâmetros de tal modo que em nenhum deles a velocidade de escoamento exceda, para as condições de dimensionamento, as velocidades máximas admissíveis obtidas de acordo com a equação (18), procurando-se, por razões de economia, que cada troço funcione em condições tão próximas quanto possível da sua capacidade máxima. Embora este critério controle também as perdas de carga nos troços, não garante que não haja violações de pressão em nós críticos da rede. Deste modo, este critério é composto por duas etapas. A primeira etapa refere-se ao dimensionamento das condutas (Figura 6.20) e a segunda etapa refere-se à verificação de pressões na rede (Figura 6.21).

A primeira etapa compreende o seguinte procedimento:

Passo 1: Arbitra-se uma solução inicial de diâmetros. Uma solução inicial aconselhável consiste na consideração de diâmetros iguais para todos os troços a dimensionar. A situação de equilíbrio hidráulico corresponde ao estado de menor dissipação de energia no sistema devida ao transporte da água para satisfação dos consumos. A consideração inicial da igualdade de diâmetros privilegia, em redes emalhadas e em igualdade de circunstâncias de diâmetro, os percursos com menores comprimentos e rugosidades – caminhos preferenciais do escoamento, fazendo passar por eles passar maiores caudais. Logo, o primeiro ciclo de correcção de diâmetros a partir da distribuição inicial vai aumentar os diâmetros das condutas desses troços, em detrimento dos mais longos e rugosos, aos quais corresponderão diâmetros mais baixos. Assim, ainda que de modo indirecto, esta solução inicial conduz a uma solução final equilibrada em termos de custos de investimento. Tem ainda a vantagem de não ser necessário arbitrar uma distribuição inicial de caudais para se obter uma solução inicial de diâmetros.

Passo 2: Com apoio do simulador, calculam-se os caudais em todas as condutas, para a situação de equilíbrio

hidráulico. De acordo com a noção de caminho preferencial do escoamento, descrita acima, é de esperar que os resultados evidenciem que existem troços que estão a trabalhar longe da sua capacidade máxima admissível, quer por excesso quer por defeito. Deste modo, há que fazer um novo redimensionamento da rede.

Passo 3: A partir da distribuição de caudais obtida, calculam-se os diâmetros teóricos, de acordo com a equação (18), que se aproximam aos diâmetros comerciais imediatamente superiores. Deve atender-se nesta fase aos diâmetros mínimos impostos.

Passo 4: Com base nos novos diâmetros, repete-se o cálculo do equilíbrio hidráulico. O processo continua até que deixe de haver alterações de diâmetros entre iterações sucessivas.

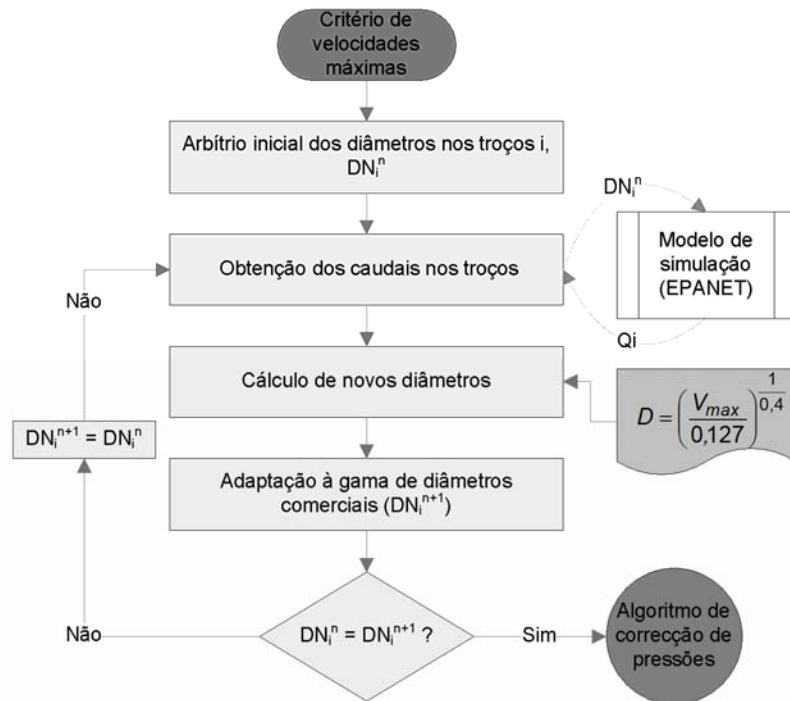



Figura 6.20 – Critério de velocidades máximas.

Uma vez que este critério não garante que não haja violações de pressão em determinados nós críticos da rede, é necessário verificar numa fase seguinte a pressão mínima admissível em cada

nó da rede. Se existirem nós com pressão inferior à mínima admissível, dá-se início a um novo ciclo iterativo, destinado a corrigir esta situação, designado por algoritmo de correcção de pressões. Quando ocorrem problemas de pressão insuficiente, é frequente que tal suceda simultaneamente em diversos nós da rede. Soluções que actuem simultaneamente em todos eles acabam por ser ineficientes ou por divergir (Alegre, 1992). Pelo contrário, uma vez solucionada a situação mais desfavorável, é frequente que a situação dos outros nós com pressão insuficiente fique resolvida por arraste.

Passo 1: Identifica-se o nó no qual a violação de pressão é maior - nó crítico.

Passo 2: Define-se o caminho preferencial do escoamento entre o ponto de abastecimento e o nó em causa – será o percurso de menores perdas de carga, ou seja, aquele a que corresponde a minimização da perda de carga.

Passo 3: De entre os troços desse caminho, identifica-se aquele que apresente maior gradiente hidráulico e aumenta-se o respectivo diâmetro para o diâmetro comercial seguinte.

Passo 4: Calcula-se de novo o equilíbrio hidráulico, e repete-se a verificação das pressões, assim como os procedimentos seguintes (Passos 2-4), caso continue a haver violações de pressão mínimas. Os nós mais desfavoráveis podem variar ao longo do processo iterativo, assim como os troços em que se actua.

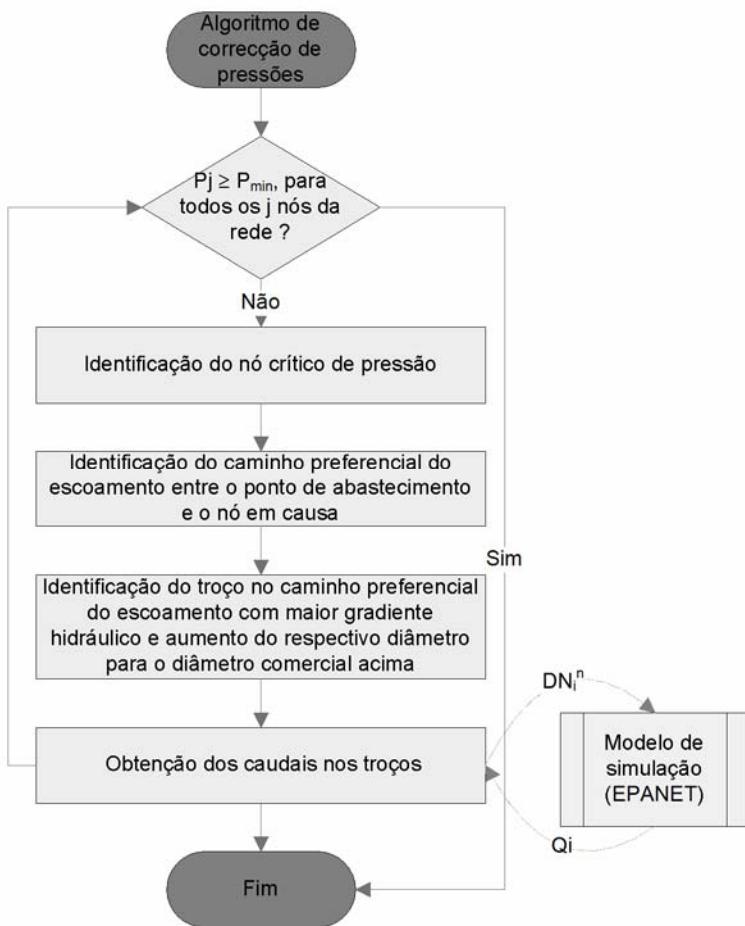



Figura 6.21 – Algoritmo de correcção de pressões.

A utilização deste método deve ser feita com precaução, não dispensando um olhar crítico por parte do projectista. Em primeiro lugar, deve ser de facto entendido como um método de pré-dimensionamento e não de dimensionamento porque atende exclusivamente aos requisitos de velocidade máxima e de pressão mínima, sem atender aos restantes pontos de vista a ter em conta. Depois, porque há situações (ex.: em certas condições, quando há mais do que uma origem de água) em que o processo iterativo pode não convergir. Por último, porque o algoritmo destinado a eliminar a violação do requisito de pressão mínima pode conduzir a aumentos de diâmetro significativos para ganhos reduzidos em

termos da pressão nos nós, pelo que se recomenda a análise comparativa dos resultados antes e depois da sua aplicação.

6.3.7.3.2 Critério da perda de carga máxima

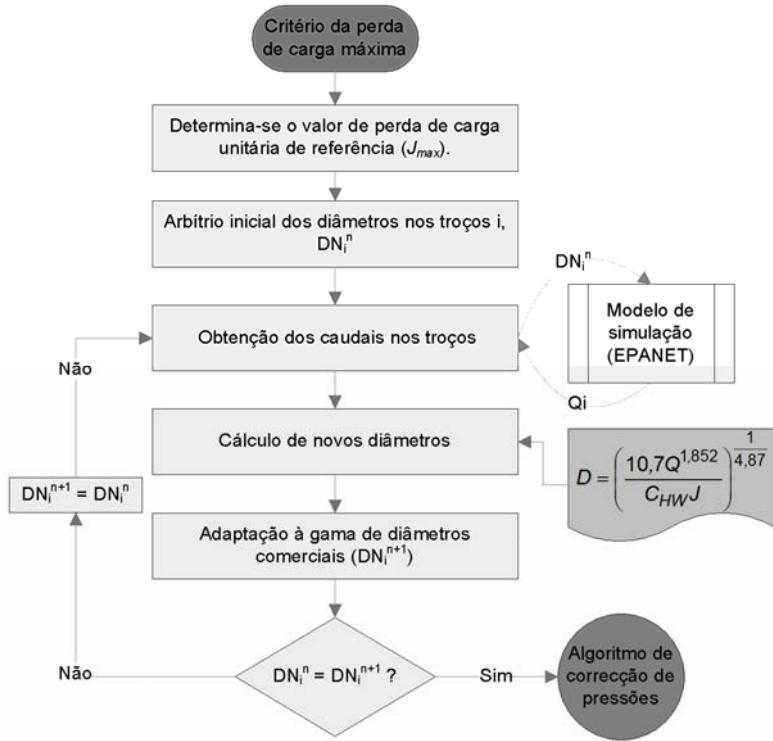
Este método compreende o seguinte procedimento:

Passo 1: Determina-se o valor de perda de carga unitária de referência. O valor deste parâmetro deve atender às características do sistema em termos de extensão e de consumos. A obtenção deste valor de referência requer a definição da máxima perda de carga unitária admissível entre cada nó e a origem de abastecimento, que é condicionada pela necessidade de cumprir a pressão mínima e a máxima flutuação de pressão regulamentares [36]. Se o valor obtido for muito elevado, pode ser necessário reduzi-lo de modo a evitar velocidades exageradas na rede. No caso de existirem vários caminhos possíveis entre o nó mais desfavorável e a origem, deve-se considerar o caminho mais curto, pois será o que conduz a uma maior perda de carga unitária.

Passo 2: Arbitra-se uma solução inicial de diâmetros. Uma solução inicial recomendável consiste na consideração de diâmetros iguais para todos os troços a dimensionar (ver critério de velocidades máximas).

Passo 3: Calculam-se os caudais em todas as condutas, para a situação de equilíbrio hidráulico. De acordo com a noção de caminho preferencial do escoamento, descrita acima, é de esperar que os resultados evidenciem que existem troços que estão a trabalhar longe da sua capacidade máxima admissível, quer por excesso quer por defeito. Deste modo, há que fazer um novo redimensionamento da rede.

Passo 4: A partir da distribuição de caudais obtida, calculam-se os diâmetros teóricos, de acordo com a equação seguinte:

[36] A flutuação de pressão no ciclo diário é função da perda de carga unitária no trajecto entre a origem e o ponto em causa

$$D = \left(\frac{10{,}7 Q^{1{,}852}}{C_{HW} J} \right)^{\frac{1}{4{,}87}} \quad (19)$$

em que J é a perda de carga de referência. Os valores dos diâmetros teóricos são então arredondados para os diâmetros comerciais imediatamente superiores. Deve atender-se nesta fase aos diâmetros mínimos impostos.

Passo 5: Com base nos novos diâmetros, repete-se o cálculo do equilíbrio hidráulico. O processo continua até que deixe de haver alterações de diâmetros entre iterações sucessivas.

Com a aplicação deste critério, a solução de dimensionamento não irá violar as restrições de pressão mínimas na rede, mas pode violar restrições de velocidade máxima regulamentarmente admissíveis. Neste caso podem seguir-se duas vias: (i) repetir o processo com uma perda de carga de referência mais baixa ou, se se tratar de violações pontuais, (ii) aumentar o diâmetro dos troços onde ocorre a violação para o diâmetro comercial seguinte.

À semelhança do método anterior, este método deve ser utilizado apenas para pré-dimensionamento.

6.3.8 Modelação do caudal de incêndio

O dimensionamento de sistemas de distribuição de água é usualmente condicionado pela necessidade de satisfazer os caudais necessários para combate a incêndio. Tal prática de dimensionamento é baseada no facto do caudal necessário para combate a incêndio usualmente exceder os consumos na rede para condições normais de funcionamento. O caudal instantâneo para combate a incêndio depende do grau de risco da zona e encontra-se definido no Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais.

Os tipos de simulação e os cenários a analisar em situação de incêndio, na fase de projecto, encontram-se descritos em 6.3.5. Em 6.3.6 descrevem-se os requisitos de projecto a garantir num sistema em situação de incêndio.

Durante a exploração e manutenção da rede, a verificação dos caudais de incêndio nas redes, através dos testes de rede,

constituem uma ferramenta importante para a análise da capacidade hidráulica da rede e para a calibração de modelos de simulação (ver sub-capítulo 5.3.4).

Para se efectuar a verificação de incêndio, o nó que representa o hidrante no modelo deve coincidir com a localização dos hidrantes na rede. Como exemplo, na Figura 6.22, as medições de pressão foram efectuadas num hidrante, localizado numa pequena conduta, e este foi representado no modelo como estando localizado no nó mais próximo - N25, localizado numa conduta de maior diâmetro. Esta simplificação poder ser razoável em condições normais de funcionamento se o hidrante e o nó se situarem relativamente próximos, e se as cotas forem similares. Contudo, em condições de incêndio, as perdas de carga são elevadas e as pressões no nó N25 e no hidrante podem ser significativamente distintas, introduzindo erros no processo de calibração.

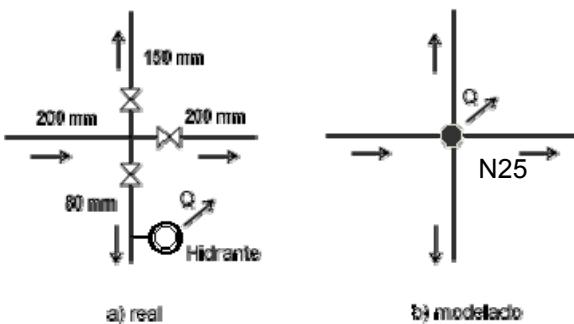



Figura 6.22 – Importância da localização correcta de hidrantes no modelo.

Existem quatro vias possíveis para determinar o caudal de combate a incêndio (Walsky *et al.*, 2003, Boulos *et al.*, 2004):

(i) adição do caudal instantâneo, em função do grau de risco, ao nó que representa o hidrante;

(ii) modelação do nó, que representa o hidrante, como uma origem de cota piezométrica fixa;

(iii) modelação do nó, que representa o hidrante, como um dispositivo emissor de caudal;

(iv) Obtenção da solução da equação pressão-caudal.

O modo mais simples de simular uma situação de incêndio num determinado nó da rede consiste em adicionar o caudal espectável

durante o incêndio ao consumo no nó em análise e verificar a respectiva distribuição de pressões, quer no nó que representa o hidrante, quer no sistema. A cota do nó pode ser configurada de forma a atender, para além da cota de terreno, à cota da boca do hidrante e às perdas de carga no ramal de ligação e no hidrante (Figura 6.23).

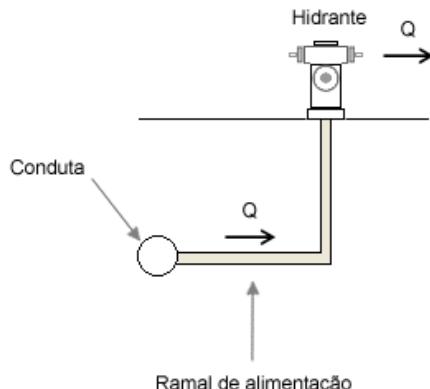



Figura 6.23 – Hidrante e ramal de ligação.

A generalidade dos programas de simulação existentes assume que o consumo nodal deve ser satisfeito independentemente da pressão resultante em consequência da satisfação dos consumos. Embora se obtenham soluções matemáticas válidas, as pressões resultantes podem não ser realistas do ponto de vista do dimensionamento ou do ponto de vista da ocorrência de cavitação (Boulos *et al*. 2004). A estimativa do consumo no nó também é dificultada devido à relação entre o caudal e a pressão.

Em condutas de grande diâmetro, o caudal é praticamente controlado pela perda de carga no ramal e no hidrante. Em condutas de pequeno diâmetro, as perdas de carga no sistema podem ser mais importantes do que as perdas de carga no ramal e no hidrante.

Uma forma alternativa de representar o hidrante a descarregar para a atmosfera, consiste em simular o hidrante através de uma conduta fictícia de pequeno comprimento, ligada a um reservatório de nível fixo com carga hidráulica igual à cota no hidrante mais a pressão mínima requerida no nó para combate a incêndio (Figura 6.24). As características da conduta (i.e., diâmetro, coeficiente da fórmula de perda de carga e comprimento) devem ser tais que a perda de carga nesta seja desprezável. Devido às elevadas

velocidades que ocorrem, as perdas de carga no hidrante e no ramal de ligação devem ser consideradas para a definição do valor da pressão mínima requerida. Após simulação, o caudal na conduta (Q_f) que liga o nó ao reservatório é o caudal disponível para combate a incêndio. Este tipo de modelação resulta num sistema equivalente ao utilizado para modelar um emissor.

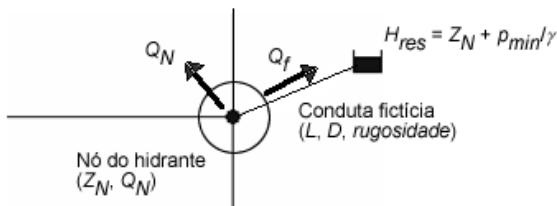



Figura 6.24 – Modelação de um hidrante (nó + conduta fictícia + RNF).

O uso de um reservatório ligado a uma conduta fictícia para representar cada hidrante aumenta o tamanho do modelo. A conduta fictícia deve estar fechada, excepto nas simulações de incêndio. Este método é mais realista que o método referido em i), pois fornece o caudal para combate a incêndio em função da pressão fixada.

Uma outra forma de representar o caudal de descarga no hidrante consiste em utilizar emissores de caudal (Figura 6.25). Um emissor de caudal é uma propriedade do nó de modelação e esta permite relacionar a pressão disponível imediatamente a montante do nó-emissor com o caudal através das seguintes expressão:

$$Q = C\sqrt{p} \qquad (20)$$

sendo *Q* o caudal de saída no emissor, *C* o coeficiente do emissor e *p* a perda de pressão no emissor.

Para se modelar um hidrante como um emissor de caudal é necessário especificar-se o valor do coeficiente do emissor. Este coeficiente incorpora dois efeitos: a conversão de parte da energia potencial disponível a montante do hidrante, em energia cinética e a perda de carga no hidrante.

Adoptando uma relação, entre pressão e caudal, similar à apresentada na equação (20) para um hidrante, obtém-se a seguinte expressão:

$$Q = c\sqrt{p} \tag{21}$$

Em que c é coeficiente do hidrante e p a perda de pressão no hidrante. A diferença entre os coeficientes C e c reside no facto do coeficiente C necessitar de ser calculado e incluir a perda de carga no hidrante, assim como a conversão da energia potencial em energia cinética, enquanto que o coeficiente c inclui apenas a perda de carga no hidrante e é um valor conhecido (i.e., usualmente fornecido a partir dos catálogos dos fabricantes).

Walski *et al*. (2003) apresenta a seguinte expressão para se obter o valor do coeficiente C, por aplicação do princípio da conservação da energia entre um ponto imediatamente a montante do hidrante e a saída do hidrante:

$$C = \frac{1}{\left[\frac{1}{2g.c_f^2}\left(1/D_0^4 - 1/D_p^4\right) + \frac{1}{c^2}\right]^{1/2}} \tag{22}$$

Em que D_0 é o diâmetro da boca do hidrante (mm), D_p é o diâmetro do ramal de ligação (mm) e C_f é o factor de conversão (C_f = 0.000785 para Q em l/s e D em mm).

Para um ramal de ligação de 150 mm e para diâmetros de bocas-de-incêndio de 63 mm e de 115 mm, a Tabela 6.1 apresenta os valores de c e de C, este último coeficiente obtido de acordo com a equação (22). Os coeficientes c foram obtidos para um hidrante com uma profundidade de 1.5 m e para um diâmetro de 140 mm (Walski *et al*. 2003).

Tabela 6.1 – Valores do coeficiente do emissor, C, para hidrantes.

Diâmetro da boca do hidrante (mm)	c (l/s/m$^{0.5}$)	C (l/s/m$^{0.5}$)
63.5	18-45	11-14
114.3	33-54	30-40

A cota no nó, que representa o hidrante, deve ser igual à cota de saída do caudal no hidrante, acrescida da pressão mínima requerida. Devido às elevadas velocidades que ocorrem nos ramais de ligação aos hidrantes, as perdas de carga que aí ocorrem podem ser importantes e não devem ser ignoradas.

Se o objectivo for a determinação do caudal máximo que pode ser fornecido num determinado nó de modelação, deve configurar-se o coeficiente do emissor para um valor elevado (p.ex., 10000) e a cota do nó para o valor de carga hidráulica requerida (cota no nó + pressão mínima requerida). O consumo no nó determina o máximo caudal que pode ser fornecido para combate a incêndio em função da carga hidráulica especificada no nó.

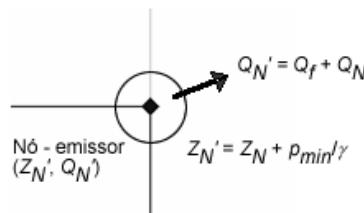



Figura 6.25 - Modelação de um hidrante (nó -emissor).

Existe ainda um quarta via para determinar o caudal de incêndio para a pressão requerida, que consiste em utilizar a expressão que representa a solução analítica da relação pressão – caudal e que é aplicável em qualquer sistema de unidades consistentes (Boulos *et al.*, 1997, Boulos *et al*. 2004):

$$Q_f = Q_t \left[\frac{H_s - H_f - c(H_t - H_f)}{H_s - H_t} \right]^{\frac{1}{n}} \tag{23}$$

Sendo:

$$c = \left(\frac{Q_s}{Q_t} \right)^{1.85} \tag{24}$$

Em que:

Q_s, H_s – caudal e carga hidráulica em regime permanente;

Q_f, H_f – caudal e carga hidráulica de incêndio;

Q_t, H_t – caudal e carga hidráulica em condições de escoamento intermédias entre o regime permanente e a situação de incêndio.

n – expoente do caudal na expressão de cálculo da perda de carga contínua utilizada (p.ex., no caso da fórmula de Hazen-Williams n = 0.54)

A equação (23) pode ser expressa em termos de pressão de acordo com a expressão seguinte:

$$Q_f = Q_t \left[\frac{p_s - p_f - c(p_t - p_f)}{p_s - p_t} \right]^{\frac{1}{n}} \tag{25}$$

Deste modo, para se obter o caudal de incêndio, num nó particular da rede, Boulos *et al.* (1997) propõe a seguinte metodologia:

i) Simular a rede para um cenário base (p.ex., consumo de ponta) e registar os valores de Q_s e H_s no nó de interesse;

ii) Converter a pressão requerida para combate a incêndio em carga hidráulica, H_f = cota no nó + pressão mínima requerida;

iii) Se $H_s < H_f$, então $Q_f = 0$; se $H_s = H_f$, então de acordo com (23) , tem-se que $Q_f = Q_t$; caso contrário $Q_t = Q_s + \Delta Q$, em que ΔQ é um incremento arbitrário de caudal;

iv) Efectuar nova simulação e obter o correspondente valor de H_t no nó;

v) Calcular o valor de Q_f de acordo com a equação (23);

vi) Verifique a convergência do método de acordo com a expressão seguinte:

$$e = \frac{|Q_f - Q_t|}{|Q_f|} \tag{26}$$

Se o erro for inferior a uma dada tolerância (p.ex., 10^{-4}), obteve-se o valor de Q_f e terminou o processo iterativo. Caso contrário, substituir os valores de Q_s e H_s pelos valores de Q_t e H_t, respectivamente, configurar $Q_t = Q_f$ e voltar novamente ao passo iv).

7 TÉCNICAS COMPLEMENTARES: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉCNICO

7.1 Introdução

Garantir que um sistema de abastecimento de água é capaz de desempenhar adequadamente a sua missão sob as mais variadas condições operacionais, em particular aquelas que sejam expectáveis durante a sua vida útil, é o objectivo último da boa gestão técnica, nas suas vertentes de planeamento, projecto, operação e manutenção.

No entanto, o desempenho dos sistemas raramente é avaliado na globalidade dos domínios relevantes, e nem sequer é explicitamente definido na prática tradicional de engenharia. Esta parte de abordagens fragmentadas em função de objectivos parcelares ou localizados, e tem dificuldade em formular os seus métodos para a gama completa de condições operacionais que são na realidade encontradas pelos sistemas.

O projecto clássico de sistemas de abastecimento de água é baseado na minimização de factores de custo, restringida pela satisfação de algumas condições simples de natureza hidráulica ou, com menos incidência, de qualidade da água.

Posteriormente, acções localizadas como o controlo de fugas, que se concentrará na redução de pressões excessivas, ou a optimização da operação, que procurará a eficiência do bombeamento ou da desinfecção, serão provavelmente tratadas sem grande percepção do restante desempenho do sistema.

A diversidade de objectivos faz com que seja genuinamente difícil abordar a globalidade do desempenho dos sistemas de forma equilibrada. No entanto, a actual tendência num mercado da água competitivo, cada vez mais orientado para o melhor nível de serviço possível no consumidor, com a melhor gestão possível dos recursos naturais e empresariais, e respeitando o enquadramento legal e regulamentar, é a de progressivamente ir tomando em consideração na mesma base todos os aspectos relevantes da gestão dos sistemas, tanto para efeitos de gestão interna, como de prestação de contas para o exterior.

A utilização sistemática de modelos de simulação é certamente uma ajuda técnica preciosa no estudo da resposta do sistema a cenários alternativos de consumos ou condições operacionais. No entanto, os resultados dos modelos de simulação podem ser bastante complexos e a sua interpretação pouco intuitiva e não imediata, sobretudo na comparação de diversos cenários ou de diferentes configurações do sistema.

Um estudo desenvolvido no LNEC neste domínio forneceu uma ferramenta para avaliação normalizada do desempenho que permite a abordagem sistematizada e equilibrada aos diversos domínios que contribuem para o bom desempenho dos sistemas. O método é detalhadamente apresentado por Coelho (1997) e Coelho e Alegre (1998), e é um desenvolvimento de trabalho anterior por Alegre (1988), Alegre e Coelho (1992) e Jowitt e Coelho (1994). A técnica foi mais recentemente alargada a sistemas de drenagem urbana (Cardoso *et al*., 2004; Cardoso *et al*., 2004a).

O sistema, que seguidamente se apresenta, é uma ferramenta de análise, concebida para apoiar a mudança de referencial na gestão técnica de sistemas de saneamento básico para uma perspectiva mais abrangente, mais rigorosa e formulada em termos de desempenho. É baseada num sistema de curvas de desempenho, suficientemente flexível para acomodar diferentes visões e objectivos, e permite um rápido ganho de sensibilidade ao comportamento das redes, proporcionando um meio de diagnóstico normalizado. O método revela grande utilidade nas tarefas de planeamento, projecto, operação e manutenção dos sistemas, podendo ser utilizado de modo sistematizado e tão automatizado quanto possível, em complemento dos modelos de simulação e análise actualmente disponíveis.

7.2 Um sistema para avaliação do desempenho técnico

O sistema pretendido à partida (Alegre e Coelho, 1992) deveria ser capaz de, para cada domínio relevante para a gestão técnica das redes de saneamento básico, classificar a sua actividade de acordo com uma escala de mérito ligada seja ao nível do serviço prestado, seja a uma perspectiva específica de desempenho técnico, ou mais geralmente a um objectivo de análise ou projecto.

Os principais requisitos para uma metodologia desse tipo são:

- flexibilidade, por forma a poder acomodar facilmente diferentes sensibilidades, perspectivas ou interpretações;
- um certo grau de normalização que permita uma abordagem multi-disciplinar; e
- uma base quantitativa e numérica, que possibilite a sua integração com as actuais ferramentas de engenharia, sobretudo com os modelos de simulação.

O sistema para avaliação do desempenho técnico aqui apresentado é definido por três tipos de entidades (Figura 7.1):

- O valor numérico de uma propriedade da rede ou variável de estado, representativa do aspecto específico em apreciação. A ferramenta mais indicada como origem dos valores de variáveis de estado, para um dado estado ou cenário de particular interesse, será a simulação matemática, tanto em termos hidráulicos, como de qualidade da água e de outros aspectos associados. Deve notar-se que o método é válido qualquer que seja a origem dos valores das variáveis de estado. Se for utilizada a simulação matemática, as suas simplificações e pressupostos são necessariamente herdados – em particular, a descrição de uma rede por um conjunto de nós (junções de condutas, mudanças de diâmetro ou de material da tubagem, pontos de alimentação ou de consumo, etc.) unidos por troços (condutas, válvulas, bombas ou outros dispositivos). A variável de estado ou propriedade da rede é assim atribuída ao nó ou ao troço. Um aspecto a reter é que a precisão do método não poderá ser maior do que a dos dados de base de que dispõe, ou seja, dos valores das variáveis de estado ou propriedades da rede. Qualquer que seja a origem dos dados, o método é essencialmente uma interpretação destes, orientada para a avaliação do desempenho. Dificilmente, portanto, poderá compensar falhas na calibração de modelos ou outras fontes de imprecisão, embora possa ser utilizado com bastante eficácia no ganho de sensibilidade às origens desses erros.

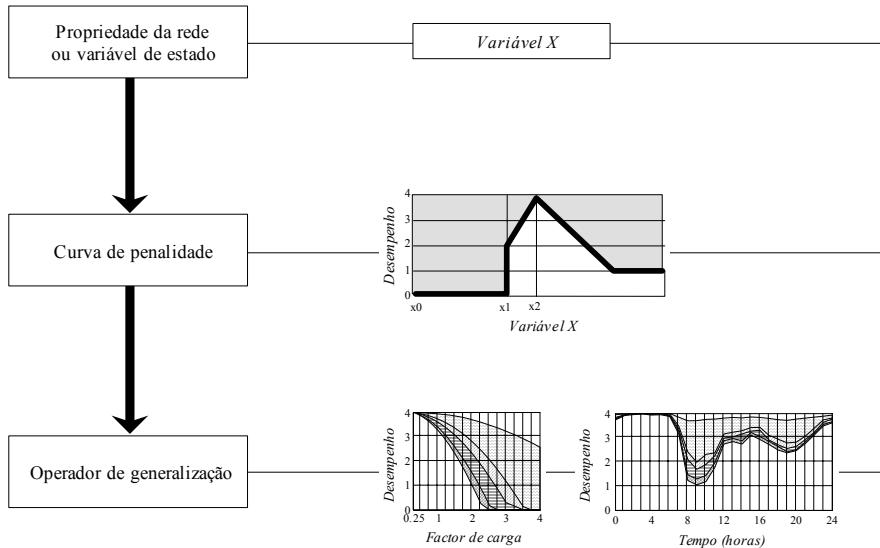



Figura 7.1 – Principais componentes do método de avaliação do desempenho de sistemas de saneamento básico

- Uma *curva de desempenho*, que traduz a classificação em termos de desempenho conferida à gama útil de valores da variável de estado ou propriedade da rede, em cada nó ou troço. O desempenho varia entre a situação de "ausência de serviço" e a situação de "serviço óptimo", e a curva penaliza o desvio em relação a esta última. A ideia-base está primordialmente relacionada com o conceito de nível de serviço, traduzindo as curvas uma classificação de senso comum do desempenho naquela perspectiva. Na realidade, as curvas são arbitrárias por natureza e poderão ser desenhadas por forma a representar uma qualquer perspectiva que o analista tenha em mente para o fim específico em estudo – na sua essência, traduzem o modo como os valores da variável de decisão são classificados pelo analista para esse fim. É aqui que reside a flexibilidade do método, embora haja vantagens em manter o desenho das curvas tão simples quanto possível. A convenção adoptada no LNEC utiliza uma escala de classificação do desempenho de 0 a 4, tal que: 0 – ausência de serviço; 1 – desempenho inaceitável; 2 – desempenho aceitável; 3 – desempenho bom; e 4 – desempenho óptimo.
- Um *operador de generalização*, que agrega os valores elementares do desempenho (em cada nó ou troço) para todo o sistema (ou partes dele), permitindo calcular o desempenho

global. Um exemplo de operador será a média simples ou ponderada, mas outros poderão ser utilizados, dependendo das circunstâncias e do objectivo da análise. Para a maioria dos parâmetros de qualidade da água, a abordagem regulamentar está interessada no valor mais desfavorável da rede, e não na média de valores – o operador de generalização a utilizar seria o percentil extremo. Por outro lado, se a análise fosse efectuada por um projectista estudando soluções alternativas, talvez uma média ponderada constituísse um bom operador para esse fim específico.

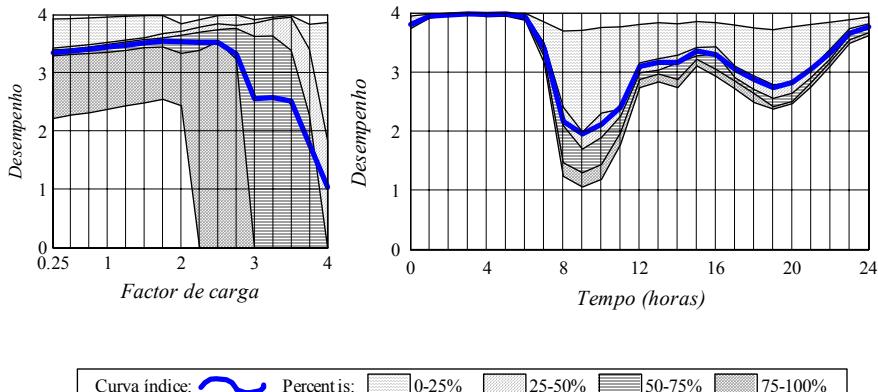



Figura 7.2 – Diagrama de sistema e diagrama de simulação em período alargado

O método produz valores do desempenho global, bem como de cada elemento (nó ou troço) do sistema. Existe assim uma população estatística de valores através da rede, que se presta a um tratamento simples mas expressivo, traduzido em diagramas em que o desempenho é traçado ao longo de um eixo que representa uma gama de condições operacionais, seja uma gama de factores de carga sobre o consumo médio (*diagrama de sistema*) ou uma variação ao longo do tempo (*diagrama de simulação em período alargado*).

A Figura 7.2 mostra os dois tipos de diagramas. A curva principal representa o desempenho global do sistema, enquanto que as áreas a sombreado representam percentis a 25%. As curvas deverão ser lidas da seguinte forma: se (x,y) são as coordenadas de um dado ponto na curva do percentil P%, tal significa que para um factor de carga de x (no diagrama de sistema), ou para o tempo t (no diagrama de simulação em período alargado), a percentagem de água distribuída com um índice de desempenho inferior ou igual a y é P%.

7.3 Domínios da avaliação do desempenho e curvas de desempenho

O primeiro passo a dar na aplicação da metodologia acima apresentada é a selecção dos domínios genéricos de avaliação do desempenho. As considerações que se seguem, tanto a respeito desta selecção como do desenvolvimento das curvas de desempenho sobre as variáveis escolhidas, sintetizam o trabalho descrito por Coelho e Alegre (1998).

O domínio de desempenho mais *imediato* de um sistema de distribuição de água é o seu comportamento hidráulico. Os processos de planear, projectar, construir e gerir uma rede de águas são primordialmente condicionados pela necessidade de satisfazer um dado conjunto de pontos de consumo com um caudal suficiente, à pressão adequada. Foi sempre esse o principal objectivo de engenheiros e projectistas, bem como o cerne do enquadramento regulamentar na maioria dos países. Medir o desempenho hidráulico é, assim, fundamental em qualquer tentativa de desenvolver um sistema tal como o que se apresenta.

As medidas de desempenho hidráulico aqui consideradas dizem respeito à pressão nos nós e à velocidade nos troços, e resultam de critérios tradicionais de projecto e operação, de quantificação relativamente simples e directa.

As medidas relacionadas com a pressão derivam de duas considerações básicas: para o correcto funcionamento hidráulico de uma rede, a pressão em cada ponto de consumo deverá situar-se entre um nível mínimo (dependente da altura dos edifícios a servir) e um nível máximo (dependente da classe de pressão das tubagens); e a superfície piezométrica não deverá sofrer flutuações apreciáveis durante a utilização normal (o limite regulamentar é de 40 m). As curvas de desempenho que correspondem a estas considerações são apresentadas na Figura 7.3 e na Figura 7.4.

Em termos de operador de generalização, e uma vez que ambas as medidas são relacionadas com os pontos de consumo, faz sentido usar uma média ponderada dos valores nodais, sendo o consumo utilizado como peso.

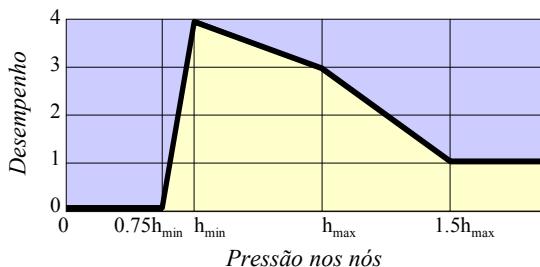



Figura 7.3 – Curva de desempenho para pressão

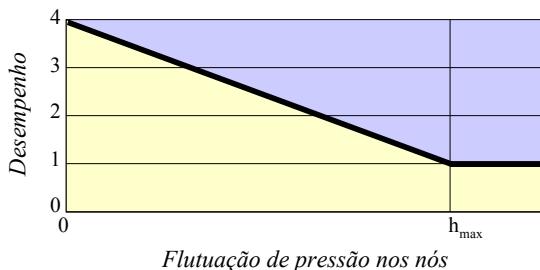



Figura 7.4 – Curva de desempenho para flutuação de pressão

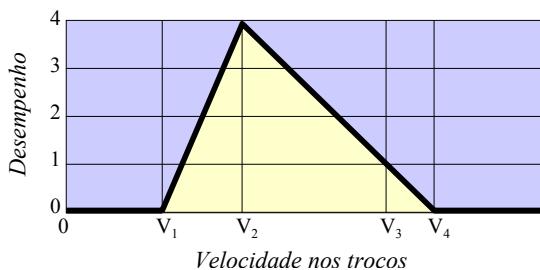



Figura 7.5 – Curva de desempenho para velocidade

Existe por parte dos projectistas e operadores de rede um justificado propósito de manter a velocidade de escoamento entre determinados limites, para evitar tanto os problemas de qualidade associados às velocidades demasiado baixas, como os regimes instáveis e os problemas estruturais provocados pelas velocidades demasiado altas. O segundo tipo de medida do desempenho está portanto associado à velocidade de escoamento, e deriva de uma classificação simples mas plausível dos valores da velocidade, tal como esquematizado na Figura 7.5. A velocidade de referência que se sugere será o valor regulamentar, função do diâmetro *D*:

$$V_{ref}\ (m/s) = 0.1274\ D^{0.4}\ (mm) \qquad (27)$$

Como alternativa, pode-se utilizar um valor específico, p.ex., V_{ref} = 0.5 m/s. Na figura, os seguintes parâmetros são utilizados: $V_1 = 0.5\ V_{ref}$, $V_2 = V_{ref}$, $V_3 = 2.0\ V_{ref}$, $V_4 = 3.0\ V_{ref}$. O operador de generalização a ser utilizado neste caso é menos intuitivo do que para as medidas de pressão. Mais uma vez, uma média ponderada parecerá o mais correcto, mas a opção sobre os pesos a utilizar é menos óbvia. Neste caso, e no sentido de incorporar tanto o comprimento como a secção, o volume das condutas é utilizado como factor de ponderação.

As entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água têm também como preocupação fundamental a necessidade de garantir a potabilidade da água fornecida, não só em termos do enquadramento regulamentar e da saúde pública, mas também no sentido da própria aceitabilidade do seu produto junto do consumidor. A qualidade da água distribuída é, assim, o outro principal domínio de interesse no que toca à avaliação do desempenho de sistemas de abastecimento de água.

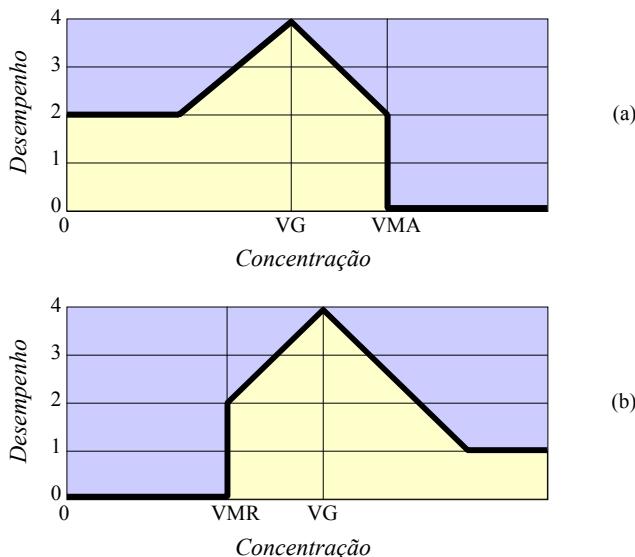



Figura 7.6 – Curvas de desempenho para (a) parâmetro indesejável e (b) parâmetro desejável

As directivas sobre qualidade da água, habitualmente expressas em termos de Valores-Guia (VG), proporcionam uma base ideal

para a avaliação do desempenho nos termos do presente método. A Figura 7.6 apresenta uma possível configuração para curvas de desempenho para os casos opostos de um parâmetro indesejável e um parâmetro desejável. O desempenho óptimo ocorrerá para o VG; o Valor Máximo Admissível (VMA) ou o Valor Mínimo Recomendado (VMR), respectivamente para as situações (a) e (b), constituem os limites da aceitabilidade; para além desses valores o desempenho é nulo. Do lado oposto da curva em relação ao pico do desempenho definido pelo VG, o traçado depende bastante do parâmetro em jogo e da natureza do próprio VG. É frequente no caso (a) que, a concentrações muito inferiores ao VG, correspondam custos de tratamento injustificados, pelo que a figura mostra um traçado da curva que também penaliza essa eventualidade, descendo o desempenho para meramente aceitável. Tal constitui um bom exemplo de uma curva de desempenho multi-objectivo, atendendo simultaneamente à qualidade da água e ao custo de tratamento. Na realidade, o VG é zero para muitos parâmetros, simplificando-se dessa forma o problema. No caso (b), os valores acima do VG poderão frequentemente corresponder a níveis mais onerosos de tratamento ou acarretar efeitos secundários indesejáveis. Um bom exemplo será o residual de cloro, ilustrado mais adiante.

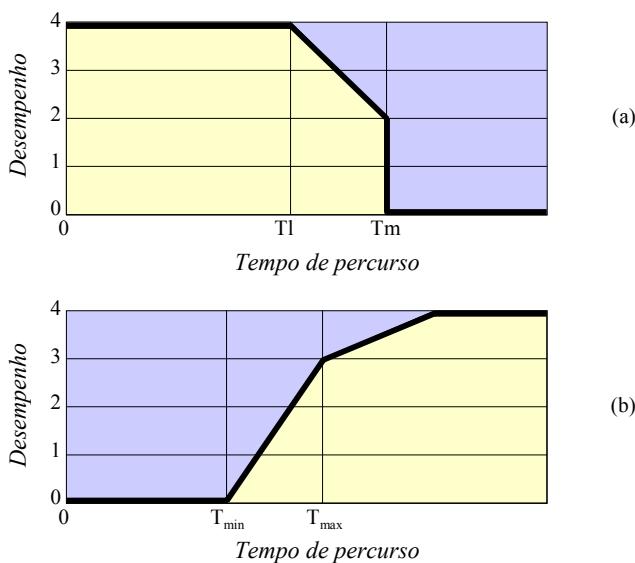



Figura 7.7 – Curvas de desempenho para (a) idade da água e (b) tempo de resposta

O tempo de percurso é outro dos resultados dos modelos de qualidade da água que se prestam a uma significativa avaliação do desempenho. A Figura 7.7 apresenta curvas de desempenho para duas aplicações diferentes do tempo de percurso como variável de avaliação do desempenho. O primeiro é a avaliação da idade da água, ou tempo decorrido desde o tratamento, em que um determinado tempo limite *Tl* é definido em função das características da água, e os pontos de consumo são classificados em função desse limite.

A curva de desempenho (a) é bastante simples, classificando qualquer tempo de percurso abaixo de *Tl* como óptimo, e permitindo uma tolerância acima desse valor, até um tempo máximo *Tm* que estará no limite da aceitabilidade. Acima de *Tm*, o desempenho é considerado nulo.

O caso (b) ilustra uma aplicação bastante mais específica dos tempos de percurso, de alcance sobretudo topológico, que se refere ao teste da vulnerabilidade do sistema a um acidente de contaminação ou falha de tratamento. Neste caso, o tempo de percurso é classificado de acordo com a capacidade de resposta da entidade gestora. Quanto mais tempo a água demorar a chegar aos nós de consumo, maior probabilidade existe de o consumidor ser avisado atempadamente.

Vários outros domínios do desempenho de sistemas de abastecimento de água podem ser explorados nesta perspectiva, dos quais o mais relevante será porventura a sua fiabilidade. Por razões óbvias, existe necessidade de procurar um nível de fiabilidade dos sistemas que permita que os níveis de serviço – ou de desempenho – desejáveis sejam garantidos nos diversos domínios, e em continuidade.

A fiabilidade dos sistemas é uma área em que algumas propostas específicas para avaliação do desempenho têm sido publicadas, e é consequentemente um terceiro domínio abordado no estudo que serve de base ao presente texto. O leitor interessado poderá encontrar um tratamento aprofundado desse domínio, bem como uma abordagem bastante mais detalhada das questões de hidráulica e de qualidade da água acima focadas, em Coelho (1997) ou Coelho e Alegre (1998).

7.4 Exemplos de aplicação

Incluem-se seguidamente alguns exemplos ilustrativos do método acima exposto. O sistema de distribuição que adiante se designará por sistema “A” serve uma área residencial de cerca de 9000 habitantes numa zona predominantemente rural, com uma topografia variada, e servirá para exemplificar a aplicação das medidas do desempenho hidráulico anteriormente referidas.

7.4.1 Diagramas de sistema

Os diagramas com a variação das três medidas de desempenho para a análise de sistema da rede A são apresentados na Figura 7.8. Começando pela medida de pressão, verifica-se que a curva tem um andamento que se pode classificar como típico, com um troço ascendente até um patamar com valores entre o bom e o óptimo, seguido de um troço descendente que acaba em valores menos bons de desempenho.

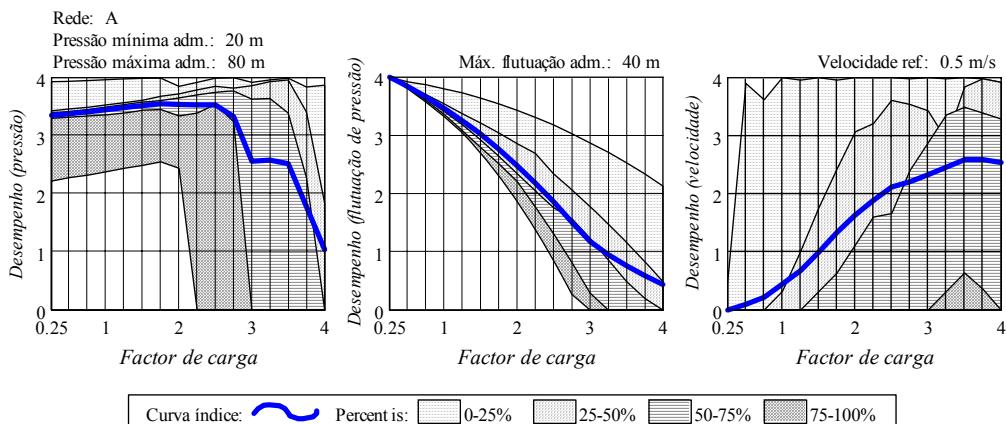



Figura 7.8 – Diagramas de sistema da rede A

O troço ascendente corresponde a uma gama de factores de carga para os quais o sistema funciona com pressões acima do mínimo recomendado – ou seja, do lado direito do pico da curva de desempenho de pressões anteriormente apresentada (ver Figura 7.3), e aproximando-se daquele à medida que o consumo aumenta e a pressão disponível diminui. A curva de sistema mantém-se acima de 3 em todo este primeiro troço, o que significa que aquelas pressões são adequadas e não excessivas. Isto, considerando apenas a curva média, uma vez que parte do percentil mais baixo – cerca de 10 a 20% do consumo – está realmente abaixo de 3, correspondendo a nós com pressões excessivas.

Com o aumento do factor de carga (aumento dos caudais consumidos) e a correspondente redução das pressões, os valores do desempenho para pressões passam o óptimo e começam a diminuir (ramo esquerdo da curva de desempenho). Isto faz com que a curva de sistema passe para um patamar horizontal e para um ramo descendente, quando as pressões disponíveis caem abaixo do mínimo recomendável.

No caso do sistema A, a curva média de desempenho mantém-se a níveis muito aceitáveis para cargas até 2.75 vezes o consumo médio. No entanto, existem nós de consumo em clara dificuldade para cargas acima de 2.00, como se pode inferir das duas bandas correspondentes aos percentis mais baixos. Acima de 3.60, o sistema atinge o seu limite e deixa de desempenhar de modo aceitável.

As bandas de percentis relativamente estreitas indicam um sistema bastante homogéneo até factores de carga de cerca de 2.00. No entanto, a descontinuidade na curva entre 3.00 e 3.75 poderá ser causada pela existência de zonas do sistema com comportamentos diferenciados para aqueles níveis de carga. Será interessante notar que a curva de desempenho cai abaixo da curva do percentil 50% a partir do factor de carga 2.00, o que corresponde a uma distribuição enviesada da população de valores do desempenho nos nós de consumo através da rede. Isto poderá indicar que os problemas são localizados ou devidos a um número relativamente pequeno de nós de consumo.

Passando agora à medida de flutuação de pressão, o respectivo diagrama mostra um comportamento típico, com uma variação suave e valores aceitáveis até factores de carga de cerca de 2.00. Até este nível, a dispersão de valores é ainda reduzida e o sistema revela-se bastante homogéneo. O declive da curva indica uma sensibilidade moderada do sistema ao factor de carga.

Quanto à medida de desempenho em termos de velocidade, o seu crescimento constante ao longo de todo o domínio estudado significa que o sistema está sobredimensionado, do ponto de vista deste critério, com velocidades demasiado baixas em toda a gama. O desempenho apenas começa a atingir valores médios aceitáveis para factores de carga superiores a 2.25, mas mesmo assim com uma grande heterogeneidade revelada pela largura das bandas de dispersão.

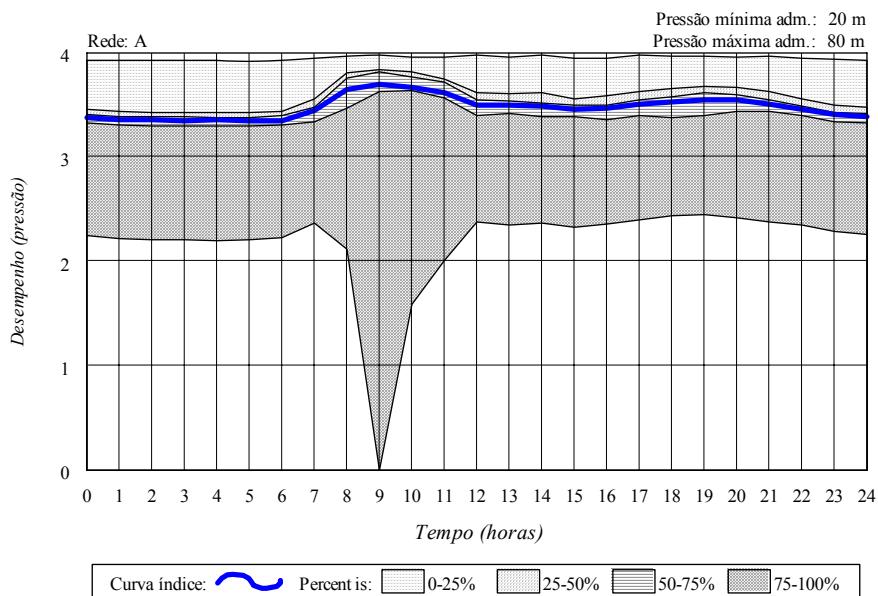



Figura 7.9 – Diagrama de simulação em período alargado da rede A (pressão)

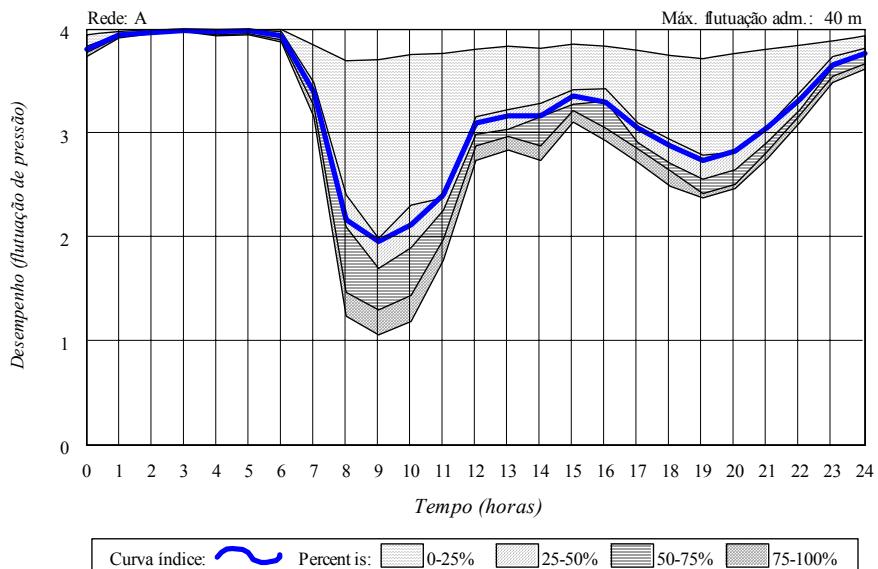



Figura 7.10 – Diagrama de simulação em período alargado da rede A (flutuação de pressão)

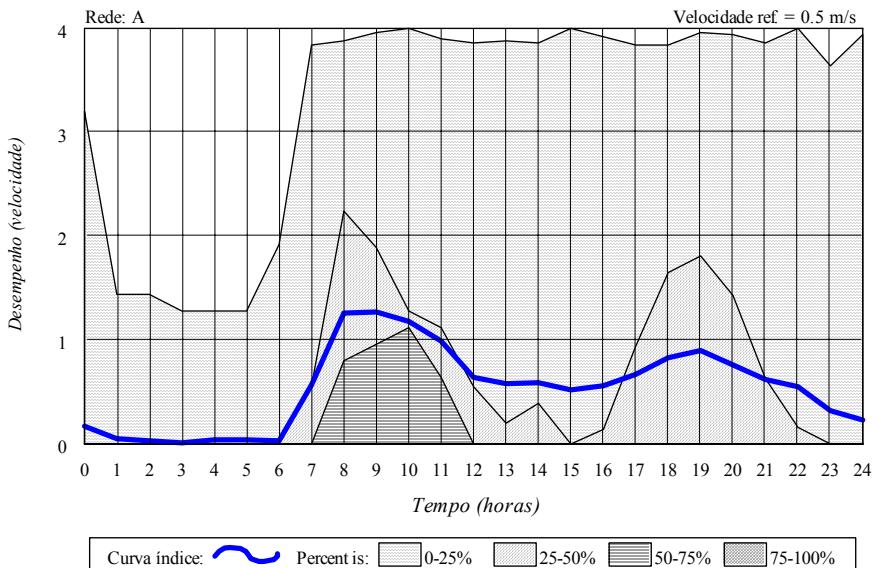



Figura 7.11 – Diagrama de simulação em período alargado da rede A (velocidade)

7.4.2 Diagramas de simulação em período alargado

Os diagramas com a variação dos três índices de desempenho ao longo de uma simulação em período alargado de 24 horas do sistema A são apresentados na Figura 7.9, na Figura 7.10 e na Figura 7.11. O índice de pressão (Figura 7.9) revela um desempenho aceitável ao longo das 24 horas. Apenas a banda do percentil mais baixo tem valores inferiores a 3.00, mas o facto de a sua largura ser muito superior à de qualquer das outras bandas, e sobretudo as intermédias, faz supor que os nós com problemas são poucos, e que intervenções localizadas poderão provavelmente melhorar o desempenho de forma significativa. A quebra súbita por volta das 09:00 horas é devida a pressões baixas ocorrendo num pequeno número de nós.

O índice de flutuação de pressão (Figura 7.10) revela um comportamento menos aceitável durante o período laboral da manhã, com uma curva média perto do valor 2.00 e 75% do consumo abaixo desse valor. Tal comportamento é provavelmente explicado pela topografia da rede, que está longe de ser plana, e pelo facto de ser parcialmente abastecida por um outro sistema com uma flutuação significativa da altura piezométrica (mais de 20 m) durante o dia.

A medida de velocidade (Figura 7.11) apenas revela aquilo que já seria de esperar após a análise do diagrama de sistema para a mesma gama de consumos. Nomeadamente, confirma que as velocidades no período nocturno são demasiado baixas em quase todo o sistema, o que pode acarretar a ocorrência de problemas de estagnação e de sedimentação.

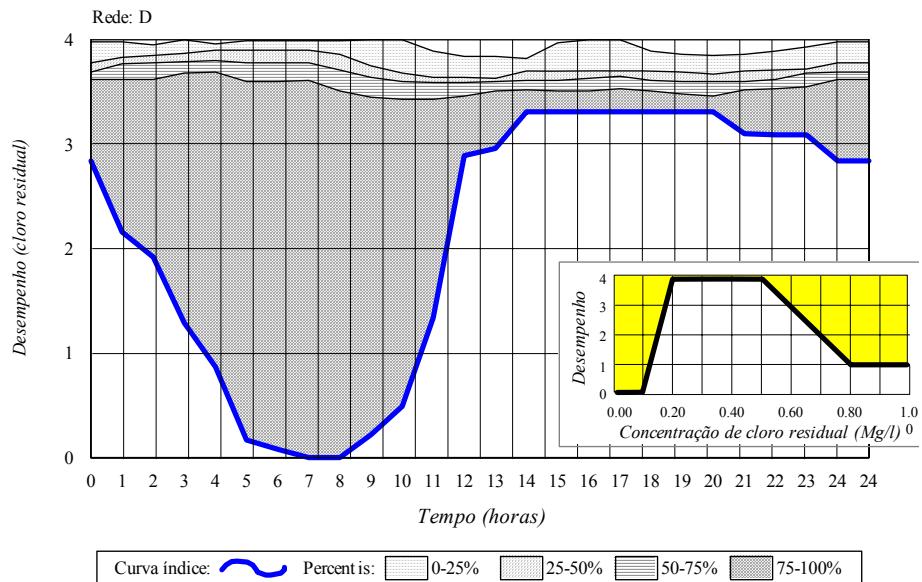



Figura 7.12 – Diagrama de simulação em período alargado da rede B para o residual de cloro

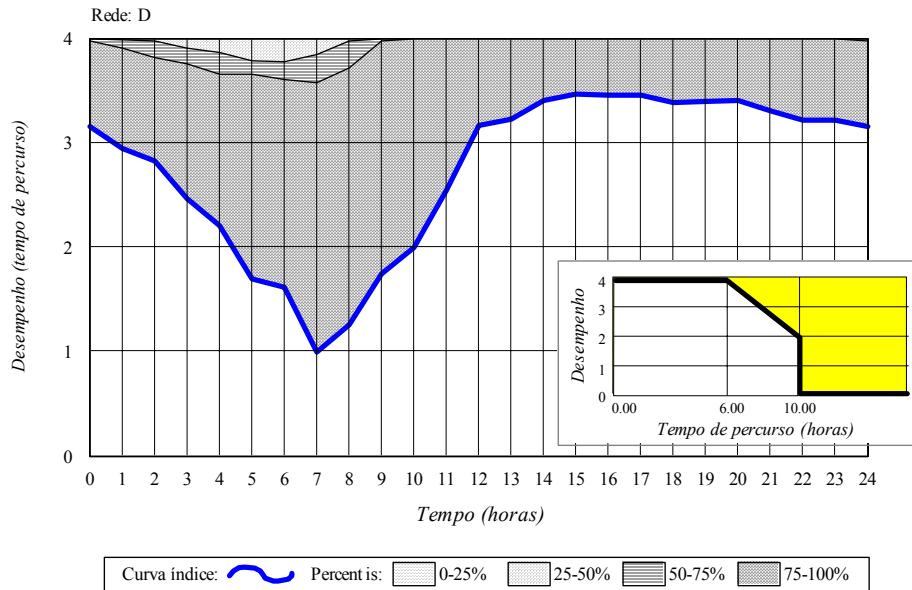



Figura 7.13 – Diagrama de simulação em período alargado da rede B para o tempo de percurso

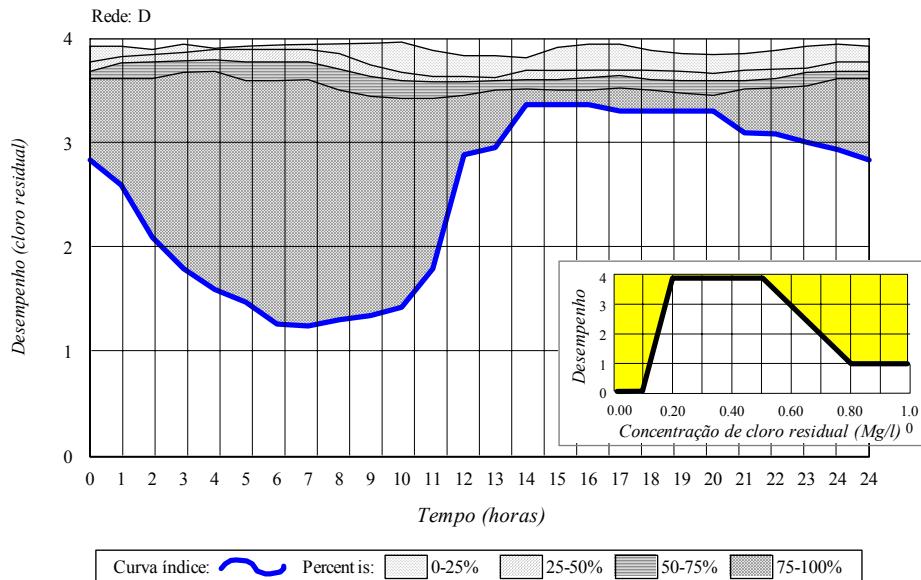



Figura 7.14 – Diagrama de simulação em período alargado da rede B para o residual de cloro, com um aumento da dose de cloragem

O segundo exemplo utiliza o sistema que se designa por "B", o qual abastece uma cidade de 300 000 habitantes, com uma topografia variada e uma configuração de rede bastante alongada, alimentada a partir de um dos extremos. Os diagramas de simulação em período alargado apresentados na Figura 7.12 e na Figura 7.13 mostram a análise de desempenho em relação ao residual de cloro (para a curva de desempenho conjuntamente representada, do tipo da Figura 7.6(b), mas reportada aos valores específicos em uso para o parâmetro em causa) e ao tempo de percurso (*TI* = 8 h). Os diagramas revelam a existência de áreas da rede com problemas de desinfecção insuficiente, provavelmente correspondentes a nós periféricos, na zona mais afastada da alimentação e com tempos de percurso mais longos.

Um ligeiro aumento na dose de desinfectante produz o diagrama da Figura 7.14, a que corresponde uma melhoria no desempenho dos nós mais desfavoráveis (percentis inferiores), acompanhada de um ligeiro abaixamento do desempenho dos nós mais favoráveis (percentil superior), pois correspondem aos nós mais perto do ponto de cloragem, que agora recebem uma dose acima do VG (e já no ramo descendente do lado direito da curva de desempenho).

8 BIBLIOGRAFIA

A lista de referências bibliográficas que se segue contém as publicações citadas no texto, bem como um conjunto de textos complementares cuja leitura se recomenda.

Para uma abordagem completa à modelação e análise de sistemas de abastecimento de água, sugere-se como ponto de partida as obras de Walski *et al.* (2003) e de Cesario (1995), que estão entre os textos de referência mais completos, sistemáticos e rigorosos até à data publicados sobre o tema.

O manual de Mays (2000) é uma compilação bastante exaustiva dos principais tópicos da gestão técnica dos sistemas de abastecimento de água, contendo abordagens detalhadas aos métodos e práticas que permitem melhorar o seu desempenho nas mais variadas vertentes. O trabalho abrangente publicado por Alegre (1992) aborda muitas dessas questões, numa perspectiva dedicada à realidade dos sistemas e das entidades gestoras em Portugal.

Os manuais de utilização dos principais simuladores (vide, p.ex., Rossman, 2002) são, por outro lado, referências incontornáveis sobre o modo como cada ferramenta específica pode ser aplicada.

Alegre, H. (1988). *Efficiency analysis of water distribution systems using pressure and stability ratios*. Proc. 17th World Conference of the International Water Suppliers Association (IWSA), Set. 1988, Rio de Janeiro, Brasil.

Alegre, H. (1992). *Ferramentas de apoio à gestão técnica de sistemas de distribuição de água urbanos*. Tese, Instituto Superior Técnico e LNEC, Lisboa, Portugal.

Alegre, H (1990). *Modelação de Redes de Distribuição de Água de Abastecimento – Guia de Utilização*. Informação Técnica e Científica de Hidráulica (ITH 31), LNEC, Lisboa, Portugal.

Alegre, H. (1986). *Modelos de Simulação de Sistemas de Distribuição de Água – Métodos de Avaliação e Distribuição de Consumos na Rede*. Informação Técnica e Científica de Hidráulica (ITH 25), LNEC, Lisboa, Portugal.

Alegre, H., Coelho, S.T. (1992). *Diagnosis of Hydraulic Performance of Water Distribution Networks*. in Pipeline Systems, eds.Coulbeck & Evans, Kluwer Academic Press, Reino Unido.

Alegre, H., Coelho, S.T. (1994). *Hydraulic performance and reliability strategies.* Short Course on Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems, Menendez Payo International University, 21-25 Nov. 1994, Valencia, Espanha.

Alegre, H. Coelho, S. T. (1998). *Princípios Relevantes para a Eficiente Gestão Técnica de Sistemas de Abastecimento de Água*. Anais do 8º Encontro Nacional de Saneamento Básico, 27-30 Outubro, Barcelos, Portugal.

Alperovits, E., Shamir, U. (1977). *Design of optimal water distribution systems*, Water Resources Research, Vol.13, No.6, 885-900.

Araújo, L., Coelho, S. T., Ramos, H. (2003) *Estimation of distributed pressure-dependent leakage and consumer demand in water supply networks*, CCWI - International Conference on Advances in Water Supply Management, 15 - 17 de Setembro de 2003, Imperial College, Reino Unido.

AWWA (1999). Calibration guidelines for water distribution system modeling. American Water Works Association Engineering Computer Applications Committee, EUA.

Baptista, J.M. (1983). *Dimensionamento económico de sistemas de distribuição de água*. Tese, Departamento de Hidráulica, LNEC, Lisboa, Portugal.

Cardoso, M.A., Coelho, S.T., Matos, M.R., Alegre, H. (2004). *Performance assessment of water supply and wastewater systems*. J.Urban Water, London. UK.

Cardoso, M.A., Coelho, S.T., Praça P., Brito, R.S., Matos, J. (2004a). *Technical performance assessment of urban sewer systems*, J. Performance of Constructed Facilities, ASCE (American Society of Civil Engineers).

Carpentier, P., Cohen, G., Hammam, Y. (1985). *Water network equilibrium. Variational formulation and comparison of numerical algorithms*, Proc. 7th European Congress on Operational Research, 1985, Bologna, Italia.

Cesario, L. (1995). *Modeling, Analysis, and Design of Water Distribution Systems*. American Water Works Association, Denver, EUA.

Coelho, S.T. (1990). *Um sistema para análise e previsão de consumos em sistemas de abastecimento de água*.

Informação Científica de Hidráulica INCH 3, LNEC, Lisboa (116 pág.). ISBN 972-49-1340-6

Coelho, S.T. (1997). *Performance in water distribution: a system's approach*, Research Studies Press, Reino Unido; distr. John Wiley & Sons, EUA (225 pág.). ISBN 0 86380 219 2 (RSP) / 0 471 97479X (J.Wiley Inc.)

Coelho, S.T., Alegre, H. (1998). *Indicadores de desempenho de sistemas de saneamento básico.* Informação Científica e Técnica (ICTH40), LNEC.

Collins, M.A, Cooper, L., Kennington, J.L. (1978). *Multiple operating points in complex pump networks*, J. Hydraulics Division, ASCE, Vol.105, No.HY3, pp.229-244.

De Schaetzen, W., Randall-Smith, M., Savic, D.A., Walters, G.A. (1999). Optimal logger density in water distribution network calibration. Proc. Water Industry Systems: Modeling and Optimization Applications, Savic & Walters Eds., Vol.1, Exeter, Reino Unido.

Epp, R. and Fowler, A.G. (1972). *Efficient code for steady-state flows in networks*, J. Hydraulics Division, ASCE, Vol.96, No.HY1, pp.43-56, EUA.

Farmani, R., Savic, D..A., Walters, G.A. (2005). *Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design*, Journal of Engineering Optimization, 37 (2), 167-185, EUA.

Germanopoulos, G. (1988). *Modelling and operational control of water supply networks*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Imperial College of Science and Technology, Londres, Reino Unido.

Grayman, W.M., Clark, R.M., Males, R.M. (1988). *Modeling distribution-system water quality: dynamic approach*, J. Water Resources Planning and Management, ASCE, 114, (3), 295-311, EUA.

Hardy-Cross, L. (1936). *Analysis of flow in networks of conduits or conductors*, Bulletin no.286, University of Illinois Experimental Station, Urbana, IL, EUA.

Hirner, W.A., Alegre, H., Coelho, S.T. (2000). *Perdas de água em sistemas de abastecimento: conceitos básicos, terminologia e indicadores de desempenho*, Revista Recursos Hídricos, Vol. 20, nº.1, APRH (15 pág.).

Jankovic-Nisic,B, Maksimovic,C, Butler,D; Graham,N (2004). *Use of flow meters for managing water supply networks*, J. Water Resources Plannning & Management ASCE, 130 (2), EUA.

Jowitt, P.J., Coelho, S.T. (1994). *Performance analysis in water supply and distribution.* in Water Pipeline Systems, ed. Coulbeck, Research Studies Press, Reino Unido.

Jowitt, P.W. & Xu, C., 1990. *Optimal Valve Control in Water Distribution Networks*. J. Water Resources Planning and Management, ASCE, July/August, pp. 455-472, EUA.

Lansey, K.E., Mays, L.W., Tung., Y.K. (2004). *Reliability and availability analysis os water distribution systems*, in Urban Water Supply Management Tools, ed. L. Mays, McGraw-Hill, ISBN 0-07-142836-4, 6.1-6.31, EUA.

Lansey, K.E., El-Shorbagy, W., Ahmed, I., Araújo, J., Haan, C.T. (2001). *Calibration assessment and data collection for water distribution systems*. J. Hydraulic Engineering ASCE, 127(4), 270. EUA.

Lee, B.H., Deininger, R.A. (1992). *Optimal location of monitoring stations in water distribution systems*. J. Environmental Engineering ASCE, 118(1), 4, EUA.

Lencastre, A. (1996). *Hidráulica geral.* Edição do autor, ISBN 972-95859-0-3, Lisboa.

Liou, C.P., Kroon, J.R. (1988). *Discussion of Grayman, W.M., Clark, R.M., Males, R.M.* (1988), EUA.

Liou, C.P., Kroon, J.R. (1987). *Modeling the propagation of waterborne substances in distribution networks*, J. American Water Works Association, November 1987, 54-58, EUA.

Martin, D.W. and Peters, G. (1963). *The application of Newton's method to network analysis by digital computer*, J. Institution of Water Engineers, Vol.17, pp.115-129, EUA.

Martínez, F., Conejos, P. & Vercher, J., 1999. *Developing an Integrated Model for Water Distribution Systems Considering both Distributed Leakage and Pressure-Dependent Demands*. Proc. 26th ASCE Wat. Res. Planning Man. Div. Conference. Tempe, Arizona, EUA.

Mays, L. W. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill, EUA.

Nielsen, H.B. (1989). *Methods for analysing pipe networks*, J. Hydraulics Division, ASCE, Vol.1115, No.2, pp.139-157.

Quintela, A. C. (1981). *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Rossman, L. (2002). *Epanet 2.0 em Português – Manual do Utilizador*. Tradução e adaptação de D. Loureiro e S.T. Coelho. Manual, LNEC, Lisboa (241 pág.). (www.dha.lnec.pt/nes/epanet). Edição impressa: *Manual do Utilizador do Epanet 2.0*. Edições IRAR (Instituto Regulador de Águas e Resíduos), série IRAR-LNEC, Lisboa, 2004.

Salgado, R., Todini, E., O'Connell, P.E. (1987). *Comparison of the gradient method with some traditional methods for the analysis of water supply distribution networks*, in Computer Applications in Water Supply, Vol.1: Systems analysis and simulation., pp.38-62, Ed.Coulbeck and Orr, Research Studies Press Ltd, Reino Unido.

Savic, D. A., Walters G. A. (1997). *Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 123(2), 67.

Todini, E., Pilati, S. (1987). *A gradient algorithm for the analysis of pipe networks*, in Computer Applications in Water Supply, Vol.1: Systems analysis and simulation., Ed.Coulbeck and Orr, Research Studies Press, UK.

Vairavamoorthy, K. & Lumbers, J., 1998. *Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control*. J. Hydraulic Engineering, ASCE, November, pp 1146-1154, EUA.

Walski, T.M. (1995). *Standards for model calibration*, Proc. AWWA Computer Conference, American Waterworks Association, Norfolk, VA, EUA.

Walski, T.M. (1990). *Sherlock Holmes meets Hardy-Cross or Model Calibration in Austin, Texas*, J. American Waterworks Association, 82(3), 34, EUA.

Walski, T.M. (1984). *Analysis of water distribution systems*, Van Nostrand Reinhold, New York, EUA.

Walski, T.M. (1983). *Technique for calibrating network models*, J. Water Resources Plannning & Management ASCE, 109(4), 360, EUA.

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling*. Haestad Methods Press, EUA (www.haestad.com).

Wood, D.J. and Charles, C.O.A. (1972). *Hydraulic network analysis using Linear Theory*, J. Hydraulics Division, ASCE, Vol.96, No.HY7, pp.1157-1170.

WRc (1989). *Network analysis – a code of practice.* Water Research Centre, Reino Unido.

Anexos

ANEXO A. FUNDAMENTOS DA TEORIA DE MODELAÇÃO MATEMÁTICA: O CASO DO EPANET 2.0

O texto que se segue baseia-se na descrição incluída no *Manual do Utilizador do Epanet 2.0*, da autoria de Lew Rossman, com tradução e adaptação de Dália Loureiro e Sérgio Teixeira Coelho (Rossman, 2002).

Cálculo do equilíbrio hidráulico

As equações da continuidade e da conservação da energia e a relação entre o caudal e a perda de carga, que caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico da rede num dado instante, podem ser resolvidas através de um Método Híbrido Nó-Malha. Todini e Pilati (1987) e, mais tarde, Salgado *et al.* (1988) optaram por designá-lo por "Método do Gradiente".

Abordagens semelhantes foram descritas por Hamam e Brameller (1971) (o "Método Híbrido") e por Osiadacz (1987) (o "Método de Newton Malha-Nó"). A única diferença entre estes métodos é o modo como os caudais nos troços são actualizados após uma nova solução de cotas piezométricas nos nós ter sido encontrada, durante o processo iterativo. O método de Todini e Pilati foi escolhido para realizar o cálculo do equilíbrio hidráulico no Epanet por ser aquele que apresenta maior simplicidade.

Considere-se uma rede com N nós e NF nós com cota piezométrica fixa (RNVs e RNFs). Considere-se que a relação caudal-perda de carga numa tubagem entre os nós *i* e *j* pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \qquad \text{(A.1)}$$

em que *H* = cota piezométrica no nó, *h* = perda de carga total, *r* = termo de perda de carga, *Q* = caudal, *n* = expoente do caudal e *m* = coeficiente de perda de carga localizada. O valor do termo de perda de carga depende da fórmula de resistência adoptada (ver abaixo). Para bombas, a parcela da perda de carga (valor negativo que representa a altura de elevação) pode ser representada pela seguinte lei

$$h_{ij} = -\omega^2 (h_0 - r\ (Q_{ij} / \omega)^n\ )$$

em que h_0 é a altura de elevação para o ponto de funcionamento em vazio (caudal nulo), ω a regulação de velocidade, e r e n são os coeficientes da curva da bomba. O segundo conjunto de equações que devem ser satisfeitas refere-se à conservação dos caudais nos nós:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \text{ para } i = 1,\ldots N \tag{A.2}$$

em que D_i é o consumo no nó e, por convenção, o caudal que chega ao nó é positivo. Assim, conhecendo a cota piezométrica nos nós de cota piezométrica fixa, pretende-se obter os valores de cota piezométrica, H_i, e de caudal, Q_{ij}, na rede que satisfaçam as equações (A.1) e (A.2).

O Método do Gradiente arbitra uma primeira distribuição de caudais nas tubagens que não tem necessariamente que satisfazer as equações de continuidade nos nós. Em cada iteração do método, novas cotas piezométricas são obtidas resolvendo a seguinte matriz:

$$\mathrm{AH} = \mathrm{F} \tag{A.3}$$

em que **A** = matriz Jacobiana (NxN), **H** = vector (Nx1) de incógnitas em termos de cota piezométrica e **F** = vector (Nx1) dos termos do lado direito da equação.

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são:

$$A_{ii} = \sum_j p_{ij}$$

enquanto que os elementos não nulos fora da diagonal são:

$$A_{ij} = -p_{ij}$$

em que p_{ij} é o inverso da derivada da perda de carga total no troço entre os nós *i* e *j* em relação ao caudal. Para tubagens,

$$p_{ij} = \frac{1}{nr\left|Q_{ij}\right|^{n-1} + 2m\left|Q_{ij}\right|}$$

enquanto que, para bombas,

$$p_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r(Q_{ij} / \omega)^{n-1}}$$

Cada termo do lado direito da matriz é composto por uma parcela respeitante ao balanço de caudal no nó, à qual é adicionado um factor de correcção de caudal:

$$F_i = \left(\sum_j Q_{ij} - D_i \right) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f$$

sendo o último termo aplicável a qualquer troço que ligue um nó *i* a um nó f de cota piezométrica fixa e o factor de correcção de caudal, y_{ij}, é dado pela seguinte expressão para tubagens:

$$y_{ij} = p_{ij} \left(r \left| Q_{ij} \right|^n + m \left| Q_{ij} \right|^2 \right) \mathrm{sgn}(Q_{ij})$$

Para bombas, é válida a seguinte expressão:

$$y_{ij} = -p_{ij} \omega^2 \left(h_0 - r(Q_{ij} / \omega)^n \right)$$

em que sgn(x) é 1 se x>0 e -1 caso contrário. (Q_{ij} é sempre positivo para bombas).

Após terem sido calculadas as cotas piezométricas, resolvendo a Eq. (A.3), os novos caudais podem ser obtidos de acordo com a equação seguinte:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \left(y_{ij} - p_{ij} \left(H_i - H_j \right) \right) \quad \text{(A.4)}$$

Se a soma de todas as variações de caudal (em valor absoluto) relativamente ao caudal total em todos os troços for superior à tolerância especificada (p.ex., 0.001), as equações (A.3) e (A.4) serão resolvidas novamente. O novo caudal obtido a partir da equação (A.4) satisfaz o princípio da continuidade do caudal nos nós, após a 1ª iteração.

O Epanet implementa este método utilizando a seguinte metodologia:

1. O sistema linear de equações traduzido pela expressão A.3 é resolvido utilizando um método de matriz exparsa baseado na reordenação dos nós (George e Liu, 1981). Após reordenação dos nós, para facilitar o preenchimento da matriz A, uma factorização simbólica é efectuada por forma a que apenas os elementos não nulos de A sejam armazenados e operados em memória. Para simulações dinâmicas, esta reordenação e factorização é efectuada apenas uma vez, no início da simulação.

2. Para a primeira iteração, o caudal numa tubagem é o correspondente à velocidade de 1 ft/s, enquanto que o caudal através da bomba é igual ao caudal de dimensionamento especificado para a bomba (todos os cálculos são internamente efectuados com a cota piezometrica em pés e o caudal em pés cúbicos por segundo).

3. O termo de perda de carga para uma tubagem (*r*) é calculado tal como descrito na Tabela 3.1. Para a equação de resistência de Darcy-Weisbach, o factor de resistência *f* é calculado por diferentes equações, dependendo do número de Reynolds (Re) do escoamento:

Fórmula de Hagen – Poiseuille para Re < 2000 (Bhave, 1991):

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

Fórmula explícita aproximada de Swamee e Jain para resolver a equação de Colebrook - White, nos casos em que Re > 4000 (Bhave, 1991):

$$\mathrm{f} = \frac{0.25}{\left[\mathrm{Log}\left(\frac{\varepsilon}{3.7\mathrm{d}} + \frac{5.74}{\mathrm{Re}^{0.9}}\right)\right]^2}$$

Interpolação cúbica do ábaco de Moody para 2000 < Re < 4000 (Dunlop, 1991):

$$f = (X1 + R(X2 + R(X3 + X4)))$$

$$R = \frac{\mathrm{Re}}{2000}$$

$$X1 = 7FA - FB$$

$$X2 = 0.128 - 17FA + 2.5FB$$

$$X3 = -0.128 + 13FA - 2FB$$

$$X4 = R(0.032 - 3FA + 0.5FB)$$

$$FA = (Y3)^{-2}$$

$$FB = FA\left(2 - \frac{0.00514215}{(Y2)(Y3)}\right)$$

$$Y2 = \frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{\mathrm{Re}^{0.9}}$$

$$Y3 = -0.86859 Ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{4000^{0.9}}\right)$$

em que ε = rugosidade absoluta e d = diâmetro da tubagem.

4. O coeficiente de perda de carga localizada (*K*), definido em função da altura cinética, é convertido para um coeficiente *m* definido em função do caudal, de acordo com a expressão seguinte:

$$m = \frac{0.02517K}{d^4}$$

5. Os dispositivos do tipo emissor nos nós são modelados através de uma tubagem fictícia que liga o nó a um reservatório fictício. Os parâmetros de perda de carga são n = (1/□ $r = (1/C)^n$ e m = 0, sendo C o coeficiente de vazão do emissor e γ o expoente de pressão. A carga hidráulica no reservatório fictício corresponde à cota topográfica no nó. O caudal obtido através da tubagem fictícia corresponde ao caudal associado ao dispositivo emissor.

6. A válvulas abertas é atribuído um valor *r* assumindo que a válvula aberta funciona como uma tubagem lisa (f = 0.02), cujo comprimento é duplo do diâmetro. No que se refere a troços fechados, assume-se que a perda de carga segue uma relação linear com um elevado factor de resistência *i*.e., $h = 10^8 Q$, pelo que $p = 10^{-8}$ e $y = Q$. Para troços em que $(r+m)Q < 10^{-7}$, $p = 10^7$ e $y = Q/n$.

7. A verificação do estado das bombas, válvulas de retenção (VR), válvulas reguladoras de caudal (VRC) e tubagens ligadas a RNVs cheios/vazios é efectuada após cada iteração, até à 10ª iteração. Após este número de iterações, a verificação do estado destes componentes é apenas efectuada quando a convergência tiver sido atingida. O estado das válvulas de controlo de pressão (VRPs e VAs) é verificado após cada iteração.

8. Durante a verificação do estado, as bombas são fechadas se a altura de elevação for maior que a altura de elevação para o ponto de funcionamento em vazio (para evitar a inversão do escoamento). À semelhança, as válvulas de retenção são fechadas se a perda de carga for negativa (ver abaixo). Quando estas condições não se verificarem, o troço é reaberto. Uma verificação similar de estado é efectuada para os troços ligados a RNVs vazios/cheios. Os troços são fechados se a diferença de cotas piezométricas conduzir à saída de caudal a partir de um reservatório vazio ou à entrada de caudal num reservatório que se encontra cheio. Estes componentes da rede são reabertos novamente na próxima verificação de estado em que estas condições já não se verificarem.

9. Verificou-se que a análise da condição - $h<0$, para determinar se a válvula de retenção deveria ser fechada ou aberta, pode gerar um procedimento cíclico entre estes dois estados em algumas redes devido a limitações de precisão numérica. O seguinte procedimento foi introduzido para efecuar um teste mais robusto ao estado de uma válvula de retenção (VR):

```
if |h| > Htol then
     if h < -Htol then  status = CLOSED
if Q < -Qtol then status = CLOSED
else
     status = OPEN
else
if Q < -Qtol  then status = CLOSED elsestatus = unchanged
```

em que Htol = 0.0005 ft e Qtol = 0.001 cfs.

10. Se na verificação de estado for fechada uma bomba aberta, uma tubagem ou uma VR, o caudal assume o valor 10^{-6} cfs. Se uma bomba for reaberta, o caudal é calculado com base na altura de elevação corrente a partir da curva característica. Se uma tubagem ou VR for reaberta, o caudal é obtido com base na equação (A.1) em ordem a *Q* para a perda de carga *h* corrente, ignorando quaiquer perdas de carga singulares.

11. Os coeficientes da matriz para válvulas de perda de carga fixa (VPCFs) são estabelecidos do seguinte modo: $p = 10^8$ e $y =$

10^8Hset, em que Hset é o parâmetro de controlo na válvula, que aqui corresponde à perda de pressão na válvula (em metros). As válvulas de borboleta (VBs) são modeladas como tubagens, tal como descrito no item 6 acima e *m* considerado como o valor convertido do parâmetro de controlo na válvula (ver passo 4 acima).

12. Os coeficientes da matriz para válvulas redutoras de pressão, válvulas de alívio e válvulas reguladoras de caudal (VRPs, VAs e VRCs) são calculados após todos os troços terem sido analisados. A verificação do estado de VRPs e VA é efectuado tal como descrito no item 7. Estas válvulas podem estar completamente abertas, completamente fechadas ou activas, em função do parâmetro de controlo (pressão ou caudal).

13. O procedimento lógico para testar uma VRP é o seguinte:

```
If current status = ACTIVE then
if  Q < -Qtol  then new status = CLOSED
if  Hi < Hset + Hml – Htol  then new status = OPEN
else new status = ACTIVE

If current status = OPEN then
if  Q < -Qtol  then new status = CLOSED
if  Hi > Hset + Hml + Htol  then new status = ACTIVE
else  new status = OPEN

If current status = CLOSED then
if Hi > Hj + Htol
   and Hi < Hset – Htol  then new status = OPEN
if Hi > Hj + Htol
   and  Hj < Hset – Htol  then new status = ACTIVE
else  new status = CLOSED
```

em que Q é o caudal actual na válvula, Hi é a cota piezométrica a montante, Hj é a cota piezométrica a jusante, Hset é o parâmetro de controlo, em termos de pressão, convertido para carga, Hml a perda de carga singular quando a válvula está aberta (= mQ^2), e Htol e Qtol são os mesmos valores utilizados para as válvulas de retenção no item 9 acima. Um conjunto semelhante de testes é utilizado para as

VAs, excepto que no que se refere à verificação em relação a Hset, os índices *i* e *j* são trocados, assim como os operadores > e <.

14. O caudal através de uma VRP activa é mantido para garantir a continuidade no nó de jusante, enquanto que o caudal através de uma VA é mantido para garantir a continuidade no nó de montante. Para uma VRP do nó *i* para o nó *j*:

$$p_{ij} = 0$$

$$F_j = F_j + 10^8\text{Hset}$$

$$A_{jj} = A_{jj} + 10^8$$

Isto obriga a que a carga no nó de jusante corresponda ao parâmetro de controlo Hset. Valores equivalentes são atribuídos para uma VA activa, excepto os índices do coeficientes F e A, que se referem ao nó *i*. Os coeficientes para VRPs e VAs abertas/fechadas são tratados do mesmo modo que para as tubagens.

15. Para uma VRC activa do nó *i* para o nó *j*, com o parâmetro de controlo Qset, tem-se que o valor de Qset é adicionado ao caudal que sai do nó *i* para o nó *j* e é subtraído de F_i e adicionado a F_j. Se a carga hidráulica no nó *i* for inferior à carga hidráulica no ní *j*, a válvula não consegue fornecer o caudal necessário e passa a ser modelada com uma tubagem.

16. Após ter sido atingida a convergência inicial (convergência de caudal e permanência de estado para VRPs e VAs), uma outra verificação de estado para bombas, VRs, VRCs e troços ligados a RNFs é efectuada. O estado de troços controlados por variações de pressão (p.ex., uma bomba cujo estado seja controlado pela pressão num nó) também é verificado. Se ocorrer qualquer alteração de estado, o cálculo iterativo deve continuar, devendo ocorrer pelo menos mais duas iterações (*i*.e., a verificação de convergência é omitida na próxima iteração). Caso contrário, a solução final foi encontrada.

17. Para simulações em período alargado, o seguinte procedimento é implementado:

   a. Após ter sido encontrada uma solução no passo de cálculo corrente, o passo de cálculo para a próxima solução corresponde ao menor dos seguintes:

      - o tempo até um novo período de consumo começar,
      - o menor tempo para um RNV encher ou esvaziar,
      - o menor tempo até o RNV atingir a altura que origina uma mudança de estado em alguns troços (p.ex., abre ou fecha uma válvula), tal como estipulado a partir de um controlo simples,
      - o tempo até um controlo simples de tempo num troço ser activado,
      - o tempo até ao próximo instante em que um controlo com condições múltiplas provoque uma alteração de estado algures na rede.

   Ao obter os passos de cálculo com base na altura de água nos RNVs, assume-se que estas variam de modo linear com base na solução corrente de caudal. A activação no tempo de controlos com condições múltiplas é calculada do seguinte modo:

      - No início de cada instante, os controlos são avaliados no passo de tempo do controlo. O valor por defeito é 1/10 do passo de cálculo de hidráulica normal (p.ex., se as características de hidráulica forem actualizadas de hora a hora, os controlos são analisados de 6 em 6 minutos).
      - Após cada passo de tempo do controlo, o instante do dia é actualizado, assim como as alturas de água nos RNVs (baseado no último conjunto de caudais nas tubagens calculado).
      - Se uma das condições de um controlo com condições múltiplas for satisfeita, as acções

são adicionadas a uma lista. Se uma acção entrar em conflito com outra já existente na lista para o mesmo troço, a acção do controlo com prioridade mais elevada permanece na lista e a outra é removida. Se a prioridade for a mesma, a acção original permanecerá na lista.

- Após todas as regras de controlo terem sido analisadas, e se a lista não estiver vazia, novas acções serão tomadas. Se estas acções causarem alterações de estado em um ou mais troços da rede, uma nova solução de hidráulica é calculada e o processo é reiniciado.
- Se não forem geradas instruções para alteração de estado dos componentes da rede, a lista de acções é apagada e avança-se a simulação para o próximo passo de tempo do controlo, a não ser que o fim do passo de tempo de hidráulica normal tenha sido atingido.

b. A simulação avança para o passo de cálculo de hidráulica obtido, no qual se obtêm novos consumos, as alturas de água nos RNVs são ajustadas com base na solução corrente de caudais e os controlos nos troços são verificados para determinar que troços alteram o estado.

c. Um novo conjunto de iterações utilizando as equações (D.3) e (D.4) é efectuado para os caudais correntes.

Cálculo da advecção, mistura e transformação de parâmetros de qualidade da água

As equações que o Epanet utiliza para obter uma solução de qualidade da água baseiam-se nos princípios da conservação da massa, conjugados com leis cinéticas de reacção. Apresentam-se, a seguir, os principais aspectos a considerar numa modelação de qualidade da água (Rossman *et al.*, 1993; Rossman e Boulos, 1996; Coelho, 1997):

8.1.1 Transporte por Advecção em Tubagens

Uma substância dissolvida é transportada ao longo de uma tubagem com a mesma velocidade média do escoamento, sujeita a uma determinada taxa de reacção (crescimento, decaimento). A dispersão longitudinal é um mecanismo de transporte usualmente pouco importante para a maioria das condições operacionais. Significa, portanto, que se admite não existir mistura de massas entre segmentos adjacentes que se deslocam ao longo da tubagem. Assim, desprezando a dispersão longitudinal, obtém-se a seguinte equação de advecção com reacção:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \qquad \text{(A.5)}$$

em que C_i = concentração (massa/volume) na tubagem *i* em função da distância x e do tempo *t*, u_i = velocidade média do escoamento (comprimento/tempo) na tubagem *i* e *r* = taxa de reacção (massa/volume/tempo), função da concentração.

8.1.2 Mistura nos Nós

Assume-se que nos nós que recebem caudal de duas ou mais tubagens ocorre mistura completa e instantânea. Deste modo, a concentração de uma substância contida no seio do escoamento que sai do nó pode ser obtida simplesmente através de um balanço de massas. Assim, pode escrever-se a seguinte equação para um nó específico:

$$C_{i|x=0} = \frac{\sum_{j \varepsilon I_k} Q_j C_{j|x=L_j} + Q_{k,ext} C_{k,ext}}{\sum_{j \varepsilon I_k} Q_j + Q_{k,ext}} \qquad \text{(A.6)}$$

em que *i* = troço com caudal que sai do nó *k*, I_k = conjunto de troços com caudal que convergem em *k*, L_j = comprimento do troço *j*, Q_j = caudal (volume/tempo) no troço *j*, $Q_{k,ext}$ = origem externa de caudal que entra na rede através no nó *k* e $C_{k,ext}$ = concentração externa de caudal que entra no nó *k*. A notação $C_{i|x=0}$ representa a concentração no início do troço *i*, enquanto que $C_{i|x=L}$ é a concentração no final do troço.

8.1.3 Mistura nos Reservatórios

A hipótese de base para o cálculo da concentração em reservatórios (RNVs e RNFs) consiste em assumir que ocorre mistura completa e instantânea nos volumes de água. Esta é uma

hipótese razoável para muitos RNFs que operam em condições de enchimento-esvaziamento, desde que seja fornecido um fluxo suficiente ao reservatório (Rossman e Grayman, 1999). Em condições de mistura completa, a concentração num RNV resulta da mistura do conteúdo do RNV com o caudal que entra. Ao mesmo tempo, a concentração interna pode ser alterada devido a reacções de decaimento ou crescimento. A equação seguinte traduz este fenómeno:

$$\frac{\partial(V_s C_s)}{\partial t} = \sum_{i\varepsilon I_s} Q_i C_{i|x=L_i} - \sum_{j\varepsilon O_s} Q_j C_s + r(C_s) \qquad \text{(A.7)}$$

em que V_s = volume armazenado no instante t, C_s = concentração na estrutura de armazenamento, I_s = conjunto de troços que fornecem caudal à estrutura de armazenamento e O_s = conjunto de troços que recebem caudal da estrutura de armazenamento.

8.1.4 Reacções no Seio do Escoamento

Enquanto uma substância é transportada ao longo de uma tubagem, ou permanece num RNV, pode reagir com outros constituintes químicos presentes no seio da água. A taxa de reacção pode ser descrita genericamente em termos da concentração elevada à potência n:

$$r = kC^n$$

em que k = coeficiente de reacção no seio do escoamento e n = ordem da reacção. Quando existe um concentração que limita o crescimento ou o decaimento último de uma substância, a taxa de reacção pode ser traduzida através da seguinte expressão:

$$R = K_b(C_L - C)C^{(n-1)} \qquad \text{para } n > 0, Kb > 0$$

$$R = K_b(C - C_L)C^{(n-1)} \qquad \text{para } n > 0, Kb < 0$$

em que C_L = concentração limite.

Apresentam-se seguidamente diferentes expressões para o cálculo da taxa de reacção instantânea (R):

- Decaimento de 1ª ordem simples (CL = 0, Kb < 0, n = 1)

$$R = K_b C$$

O decaimento de várias substâncias, como seja o cloro residual, pode ser modelado adequadamente utilizando uma lei de decaimento de 1ª ordem.

- Crescimento de 1ª ordem saturado (CL > 0, Kb > 0, n = 1):

$$R = K_b(C_L - C)$$

Este modelo pode ser utilizado para modelar o crescimento de subprodutos de desinfecção, como sejam os trihalometanos, em que a formação última de subprodutos (C_L) é limitada pela quantidade de material reactivo presente.

- Decaimento de 2ª ordem - Dois Componentes (CL ≠ 0, Kb < 0, n = 2):

$$R = K_b C(C - C_L)$$

Este modelo assume que a substância A reage com a substância B a uma taxa desconhecida para produzir o produto P. A taxa de consumo de A é proporcional ao produto de A e B remanescente. CL pode ser positivo ou negativo, dependendo de o componente A ou B estar ou não em excesso, respectivamente. Clark (1998) obteve bons resultados ao aplicar este modelo a dados de decaimento do cloro, que não se ajustavam bem utilizando um modelo simples de 1ª ordem.

- Cinética de Decaimento de Michaelis-Menton (CL > 0, Kb < 0, n < 0):

$$R = \frac{K_b C}{C_L - C}$$

No caso particular de ser especificado um valor negativo para a ordem n da reacção, o Epanet utilizará a equação de reacção de Michaelis-Menton, mostrada acima, para uma reacção de decaimento. (Para reacções de crescimento, o denominador passa a ser C_L + C.) Esta equação de reacção é usualmente utilizada para descrever reacções do tipo enzima-catalizador ou crescimento microbiano. Produz um comportamento de primeira ordem para baixas concentrações e um comportamento de ordem zero para elevadas concentrações. Note-se que, para reacções de decaimento, CL deverá ser superior à concentração inicial que se verificar.

Koechling (1998) aplicou a lei cinética de Michaelis-Menton para modelar o decaimento do cloro em diferentes tipos de águas e

verificou que K_b e C_L podiam ser relacionados com o conteúdo orgânico da água e com a respectiva absorvância no ultravioleta, de acordo com as expressões seguintes:

$$K_b = -0.32UVA^{1.365}\frac{(100UVA)}{DOC}$$

$$C_L = 4.98UVA - 1.91DOC$$

em que UVA = absorvância no ultravioleta a 254 nm (1/cm) e DOC = concentração de carbono orgânico dissolvido (mg/L).

Nota: Estas expressões são apenas aplicáveis a valores de K_b e C_L que sejam utilizados na equação de reacção de Michaelis-Menton.

- Crescimento de Ordem Zero (CL = 0, Kb = 1, n = 0)

  $$R = 1.0$$

Esta equação particular pode ser utilizada para modelar a idade da água onde, por cada unidade de tempo, a "concentração" (p.ex., idade) aumenta de uma unidade.

A relação entre o coeficiente de reacção no seio do escoamento a uma temperatura T1 e o respectivo valor a uma temperatura T2 é usualmente modelada através da equação de Van'*t* Hoff - Arrehnius:

$$K_{b2} = K_{b1}\theta^{T2-T1}$$

em que θ é uma constante. Numa investigação especificamente realizada para o cloro, θ foi estimado em 1.1 para T1 a 20ºC (Koechling, 1998).

8.1.5 Reacções na Parede da Tubagem

Durante o mecanismo de transporte nas tubagens, as substâncias dissolvidas podem ser transportadas para a parede da tubagem e reagir com materiais, como sejam os produtos de corrosão ou biofilme, que se encontrem junto ou na parede da tubagem. A área de tubagem disponível para reacção e a taxa de transferência de massa entre o seio do escoamento e a parede também influenciam a taxa de reacção. O raio hidráulico, que para uma tubagem é igual ao raio a dividir por dois, determina o factor de forma. O efeito de transferência de massa pode ser representado por um coeficiente de transferência de massa, cujo valor depende da difusão molecular das espécies reactivas e do número de Reynolds do escoamento (Rossman et. al, 1994). Para leis cinéticas de 1ª

ordem, a taxa de reacção na tubagem pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$r = \frac{2k_w k_f C}{R(k_w + k_f)}$$

em que k_w = coeficiente de reacção na parede (comprimento/tempo), k_f = coeficiente de transferência de massa (comprimento/tempo) e R = raio da tubagem. Para cinéticas de ordem zero, a taxa de reacção não pode ser superior à taxa de transferência de massa

$$r = MIN(k_w, k_f C)(2/R)$$

em que k_w tem agora as unidades de massa/área/tempo.

Os coeficientes de transferência de massa são usualmente expressos em termos do número adimensional de Sherwood (*Sh*):

$$k_f = Sh\frac{D}{d}$$

em que *D* = difusão molecular da espécie a ser transportada (comprimento^2/tempo) e *d* = diâmetro da tubagem. Em regime laminar, o número de Sherwood médio ao longo do comprimento de uma tubagem pode ser expresso do seguinte modo

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668(d/L)\,\mathrm{Re}\,Sc}{1 + 0.04\left[(d/L)\,\mathrm{Re}\,Sc\right]^{2/3}}$$

em que *Re* = número de Reynolds e *Sc* = número de Schmidt (viscosidade cinemática da água a dividir pela difusão molecular do químico) (Edwards *et al.*, 1976). Para escoamento turbulento, a correlação empírica de Notter e Sleicher (1971) pode ser utilizada:

$$Sh = 0.0149\,\mathrm{Re}^{0.88}\,Sc^{1/3}$$

8.1.6 Sistema de Equações

Quando aplicadas a uma rede, as equações A.5-A.7 representam um conjunto de equações diferenciais/algébricas, com coeficientes variáveis em função do tempo, que permitem obter os valores de C_i nas tubagens *i* e de C_s em cada RNV. Estas soluções estão sujeitas ao seguinte conjunto de condições externas:

- condições iniciais que especificam os valores de Ci para todos os valores de x na tubagem i e Cs em cada reservatório no instante 0,
- condições de fronteira que especificam valores para Ck,ext e Qk,ext para todos os instantes t, em cada nó k onde existam entradas extremas de massa
- condições de hidráulica que especifiquem o volume Vs em cada RNV e o caudal Qi no troço i para todos os instantes t.

8.1.7 Algoritmo Lagrangeano de Transporte

O simulador de qualidade da água do Epanet utiliza o método lagrangeano para seguir o destino de parcelas discretas de água (modelados como segmentos), à medida que estas se deslocam nas tubagens e se misturam nos nós, entre passos de cálculo com comprimento fixo (Liou e Kroon, 1987).

Um passo de cálculo de qualidade da água deve ser tipicamente mais pequeno que o passo de cálculo de hidráulica (p.ex., minutos em vez de horas) para ter em conta pequenos tempos de percurso que possam ocorrer nas tubagens.

À medida que o tempo avança, o tamanho do segmento mais a montante na tubagem aumenta com a entrada de água, enquanto que uma igual perda de tamanho ocorre no segmento mais a jusante à medida que a água sai da tubagem. O tamanho dos segmentos intermédios permanece inalterado. (ver Figura A.1).

Os seguintes passos ocorrem no final de cada passo de cálculo:

1. A qualidade da água em cada segmento é actualizada de modo reflectir qualquer reacção que possa ter ocorrido ao longo do passo de cálculo.

2. A água que entra em cada nó proveniente de parcelas de água de várias tubagens com caudal é misturada com o caudal externo (se existir) para calcular um novo valor de concentração da água no nó. A contribuição do volume proveniente de cada segmento é igual ao produto do caudal na tubagem pelo passo de cálculo. Se este produto exceder o volume do segmento, o segmento é destruído e o próximo segmento (aquele que se lhe segue na tubagem) começa a contribuir com o seu volume.

3. Contribuições de origens externas são adicionadas aos valores de qualidade nos nós. A concentração em RNVs é actualizada

dependendo do método utilizado para modelar a mistura em cada RNV (ver abaixo).

4. Novos segmentos são criados em tubagens com o caudal que sai de cada nó, RNF e RNV. O volume do segmento é igual ao produto do caudal na tubagem pelo passo de cálculo. A concentração no novo segmento é igual ao novo valor de concentração no nó.

Para reduzir o número de segmentos, o passo 4 é apenas executado se a nova concentração no nó diferir do valor da concentração no último segmento da tubagem de saída, dentro de uma tolerância previamente especificada. Se a diferença na concentração estiver abaixo da tolerância especificada, o tamanho do último segmento da tubagem de saída é simplesmente aumentado de um volume correspondente ao produto do caudal na tubagem pelo passo de cálculo respectivo.

Este processo é repetido para o próximo passo de cálculo de qualidade da água. No início do próximo passo de hidráulica, a ordem dos segmentos em troços cujo caudal tenha invertido o sentido é trocada. Inicialmente, cada tubagem na rede é composta por um único segmento, cuja concentração é igual à concentração inicial no nó de montante.

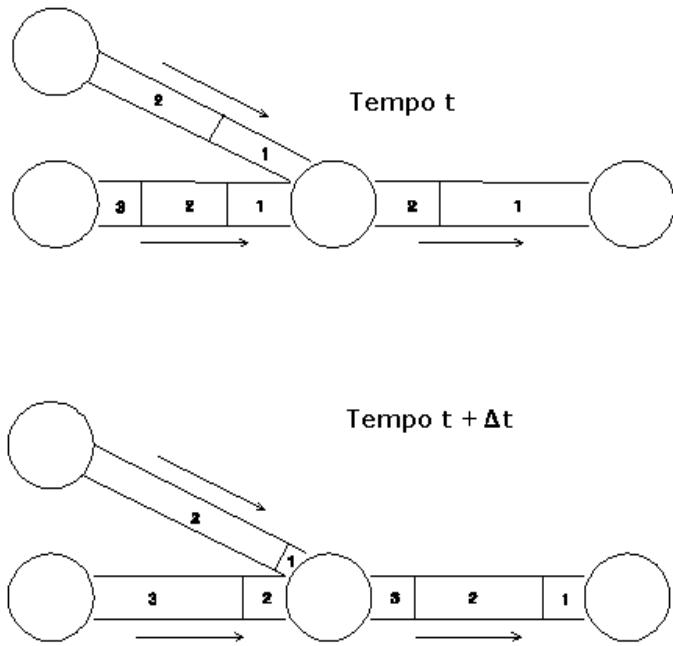



Figura A.1 – Comportamento dos segmentos de acordo com o Método Lagrageano

Referências

Bhave, P.R. 1991. Analysis of Flow in Water Distribution Networks. Technomic Publishing. Lancaster, PA.

Clark, R.M. 1998. "Chlorine demand and Trihalomethane formation kinetics: a second-order model", Jour. Env. Eng., Vol. 124, No. 1, pp. 16-24.

Coelho, S.T. (1997). *Performance in water distribution: a system's approach*, Research Studies Press, Reino Unido; distr. John Wiley & Sons, EUA (225 pág.).
ISBN 0 86380 219 2 (RSP) / 0 471 97479X (J.Wiley Inc.)

Dunlop, E.J. 1991. WADI Users Manual. Local Government Computer Services Board, Dublin, Ireland.

George, A. & Liu, J. W-H. 1981. Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Hamam, Y.M, & Brameller, A. 1971. "Hybrid method for the solution of piping networks", Proc. IEE, Vol. 113, No. 11, pp. 1607-1612.

Koechling, M.T. 1998. Assessment and Modeling of Chlorine Reactions with Natural Organic Matter: Impact of Source Water Quality and Reaction Conditions, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio.

Liou, C.P. and Kroon, J.R. 1987. “Modeling the propagation of waterborne substances in distribution networks”, J. AWWA, 79(11), 54-58.

Notter, R.H. and Sleicher, C.A. 1971. “The eddy diffusivity in the turbulent boundary layer near a wall”, Chem. Eng. Sci., Vol. 26, pp. 161-171.

Osiadacz, A.J. 1987. Simulation and Analysis of Gas Networks. E. & F.N. Spon, London.

Rossman, L.A., Boulos, P.F., and Altman, T. (1993). “Discrete volume-element method for network water-quality models”, J. Water Resour. Plng. and Mgmt,, Vol. 119, No. 5, 505-517.

Rossman, L.A., Clark, R.M., and Grayman, W.M. (1994). “Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems”, Jour. Env. Eng., Vol. 120, No. 4, 803-820.

Rossman, L.A. and Boulos, P.F. (1996). “Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: A comparison”, J. Water Resour. Plng. and Mgmt, Vol. 122, No. 2, 137-146.

Rossman, L.A. and Grayman, W.M. 1999. “Scale-model studies of mixing in drinking water storage tanks”, Jour. Env. Eng., Vol. 125, No. 8, pp. 755-761.

Salgado, R., Todini, E., & O'Connell, P.E. 1988. "Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks". Proc. Inter. Symposium on Computer Modeling of Water Distribution Systems, University of Kentucky, May 12-13.

Todini, E. & Pilati, S. 1987. "A gradient method for the analysis of pipe networks". International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK, September 8-10.

ANEXO B. METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DA GEOMETRIA DA REDE NO EPANET 2.0 A PARTIR DO CADASTRO INFORMATIZADO

Introdução

Os dados de cadastro constituem a informação de base para a construção de um modelo. Estes podem estar armazenados sob diferentes formatos, que podem variar desde o formato não gráfico, ao suporte gráfico mas não digitalizado, e ao suporte gráfico em CAD ou em SIG, o qual consiste na combinação entre o formato gráfico e um conjunto de dados de cadastro estruturados e armazenados numa base de dados.

Neste documento referem-se alguns aspectos importantes a ter em consideração para o traçado de uma rede em CAD, assim como a metodologia recomendada para converter ficheiros .dxf em ficheiros de rede (.inp), utilizáveis directamente pelo Epanet 2.0.

Representação da informação em ficheiros CAD

Geralmente, os desenhos em CAD não são concebidos com a preocupação de utilizar posteriormente a informação gerada num modelo de simulação. Quando se considera esta opção, devem ser tidos em conta determinados aspectos, em termos de traçado, por forma a que o modelo esteja o mais próximo possível da realidade e que as modificações a introduzir no modelo para completar o traçado da rede sejam mínimas.

A partir de um desenho em CAD, apenas é possível obter o traçado da rede em termos de condutas e nós. Outros elementos como válvulas, bombas e reservatórios têm que ser introduzidos mais tarde utilizando o próprio *software* de simulação. Deste modo, o traçado-base de uma rede é composto apenas por troços e nós, tal como descrito em **4.3.3**.

Os troços de conduta devem ter as mesmas características ao longo do seu comprimento (e.g., diâmetro e material) e representam elementos físicos da rede. Os nós são elementos fictícios criados para modelar pontos específicos da rede (e.g., mudanças de

material, cruzamentos de condutas, pontos de consumo ou medição) e são introduzidos sempre que há uma descontinuidade de um troço. Deste modo, devem ser criados novos troços de conduta sempre que ocorra uma das seguintes situações:

- intersecções de condutas;
- mudança de idade, classe de pressão;
- pontos de medição ou de (re)cloragem;
- mudanças de sector;
- grandes consumidores (p.ex:, hospitais, escolas, centros desportivos);
- mudanças de arruamento;
- válvulas de controlo[37] (i.e., válvulas reguladoras de pressão ou de caudal, válvulas de sector ou de zona);
- bombas.

No caso da ocorrência de intersecções de condutas, existem aspectos importantes a atender no seu traçado:

- distinguir a situação em que o cruzamento corresponde a uma intersecção efectiva da situação que representa uma passagem inferior ou superior de condutas;
- representar adequadamente o início e o final de troços interligados.

As condutas possuem habitualmente singularidades, tais como curvas, estrangulamentos, estreitamentos ou válvulas de seccionamento. Em termos de modelação, uma conduta com singularidades e com válvula de seccionamento pode ser considerada como um único troço. Um troço pode estar associado a um coeficiente de perda de carga singular e estar aberto ou fechado, simulando a existência de uma válvula de seccionamento.

---

[37] Para efeitos de modelação, não é absolutamente necessário incluir na representação do cadastro electrónico todas as válvulas de seccionamento e/ou isolamento da rede. Os modelos actuais consideram estas válvulas como equipamento básico (por defeito) de qualquer conduta, e como tal não são individualizadas na representação esquemática (ver 4.3.10)

Conversão dos ficheiros CAD (.dxf) para ficheiros de dados do modelo (.inp)

Obtidos os desenhos CAD em formato .dxf, a conversão para o ficheiro ASCII de dados de modelação em formato .inp pode ser feita utilizando uma ferramenta complementar ao *software* de modelação Epanet. A ferramenta designa-se por DXF2EPA (Rossman, 2001) e pode ser descarregada na página de *web* do Epanet 2.0 em Português (www.dha.lnec.pt/nes/epanet).

Este utilitário converte as *layers* seleccionadas (contendo linhas desenhadas com objectos do tipo *line* e *3Dpolyline*) num conjunto de troços e nós, com todas as coordenadas e vértices de condutas intactos.

Elementos especiais, como reservatórios de nível fixo ou variável, bombas e válvulas deverão ser adicionados manualmente no próprio ambiente do Epanet 2.0.

Embora o utilitário possua a opção de cálculo automático dos comprimentos das condutas, outros dados da rede, como sejam a cota dos nós, os consumos, o diâmetro das condutas e os coeficientes de rugosidade deverão ser adicionados posteriormente. Tal poderá ser efectuado seja no ficheiro de dados de modelação .inp. entretanto criado, seja já no ambiente de trabalho do simulador.

O utilitário é composto por uma sequência de quatro páginas, através das quais o utilizador vai fornecendo informação necessária para a conversão dos ficheiros, podendo navegar progressivamente ou regressivamente entre páginas.

A informação associada a cada página é a seguinte:

Página 1

- Localização do ficheiro .dxf a converter.
- Nome do ficheiro de dados de modelação a criar.
- Texto contendo o título do projecto de modelação, a criar no ficheiro de dados.

Página 2

- Selecção das *layers* do desenho a converter para obtenção do traçado da rede no modelo, em termos de troços e nós. Se não for seleccionada qualquer *layer*, todos os objectos contidos no desenho serão convertidos.

Página 3

- Tolerância espacial admissível para a criação de nós (em unidades do desenho). Todos os finais de troços cuja distância ao nó seja inferior à tolerância especificada serão associados a esse nó.
- Opção para calcular automaticamente os comprimentos de conduta (em unidades do desenho).

Página 4

- Prefixo e incremento de numeração a utilizar para os identificadores dos nós.
- Prefixo e incremento de numeração a utilizar para os identificadores dos troços.

Na última página, o utilizador pode premir o botão *Convert* para iniciar o processo de conversão. O programa indicará se a conversão foi bem sucedida ou se foram detectados erros. Após ter-se executado esta aplicação com sucesso, o ficheiro de dados obtido poder ser aberto no Epanet ou em qualquer outro simulador capaz de ler o formato .inp.

Dificuldades na conversão de ficheiros .dxf em ficheiros .inp

São dois os tipos de problemas que surgem mais frequentemente na conversão de ficheiros .dxf para ficheiros .inp.

O primeiro prende-se com o tipo de separador decimal utilizado. Para fazer a conversão dos ficheiros, o computador deve estar configurado para que o separador decimal seja o ponto (.) e não a vírgula (,).

O segundo problema diz respeito à conversão de *polylines* para elementos do tipo troços e nós. Vários utilizadores detectaram que o conversor de ficheiros não permite que se utilizem *polylines* para representar troços.

Em substituição do objecto *polyline* deve utilizar-se o objecto *3Dpolyline*. No caso de ficheiros com os troços já construídos utilizando o objecto *polyline*, pode utilizar-se o seguinte conjunto de instruções a partir do autoCAD para converter troços do tipo *polyline* em *3Dpolyline*:

1. escrever “*convertpoly*” a partir da linha de comandos e prima a tecla enter.

2. introduzir a opção "*heavy*" (H).
3. seleccionar os objectos *polyline* a converter.
4. premir a tecla *enter* para terminar a instrução.

Carregamento de dados adicionais sobre o cadastro

Apesar do processo acima descrito facilitar o traçado da rede, é necessário efectuar sempre uma verificação do traçado que foi importado, sobretudo em termos de intersecções entre condutas. O levantamento das cotas de terreno de todos os nós da rede exige a consulta das plantas de cadastro existentes em papel.

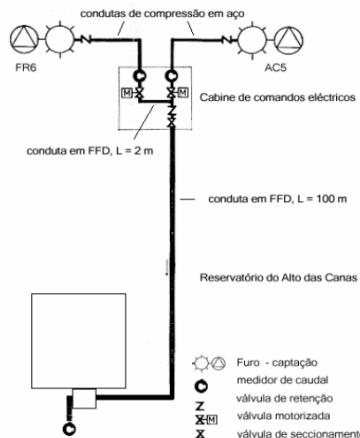
ANEXO C. FICHAS TÉCNICAS DE MODELAÇÃO

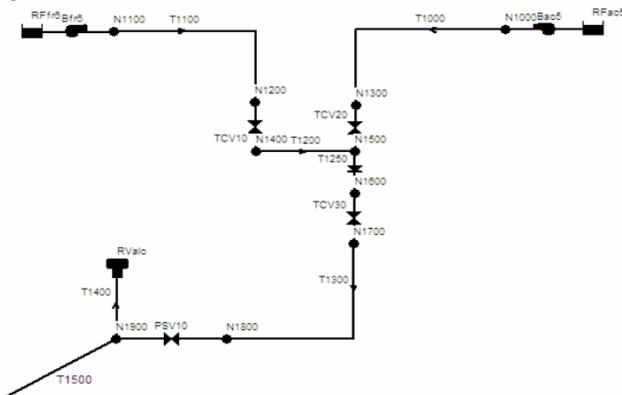
As páginas seguintes contêm exemplos de Ficha Técnicas de modelação:

- a ficha técnica de uma instalação composta por captações subterrâneas com bombas submersíveis e reservatório com entrada de água acima da superfície livre;
- uma sugestão de formulário para fichas técnicas de rede, com a descrição dos elementos relativos aos nós, condutas e válvulas.

ALTO DAS CANAS

1. DESCRIÇÃO

Identificação: Origem de abastecimento de Canas

Código: ALC

Sector:

Resumo:

A rede é abastecida por captações subterrâneas situadas na zona de Canas, equipadas com bombas submersíveis. As bombas submersíveis situam-se a 70 m de profundidade e possuem características idênticas. Reservatório com estrada de água acima da superfície livre.

2.CONFIGURAÇÃO NO CADASTRO

3.CONFIGURAÇÃO E NOMENCLATURA NO MODELO

Legenda

Dispositivo	ID
reservatórios de nível fixo	RFfr6, RFac5
reservatórios de nível variável	Rvalc
bombas	Bfr6, Bac5
válvulas de seccionamento	TCV10, TCV20, TCV30
tubagens	T1200, T1300, T1500
nós com medição	N1200, N1300, N1900
nós de consumo	
válvulas de retenção	T1250
válvulas de alívio	PSV10
válvulas reguladoras de caudal	não existe
by-pass seccionável (troços)	não existe

4.RESERVATÓRIOS DE NÍVEL VARIÁVEL: GEOMETRIA E COTAS

CÉLULA 1 ID RValc	VALOR
tipo	apoiado
tipo de secção transversal	rectangular
diâmetro (diâmetro equivalente ou curva de volume)	largura =14 m; Dequivalente = 16.00
cota da soleira	253.00
altura de entrada de água	4.50
altura de água mínima	1.00
altura de água máxima	4.00

CÉLULA 2 ID	VALOR
tipo	seleccionar
tipo de secção transversal	
diâmetro (diâmetro equivalente ou curva de volume)	
cota da soleira	
altura de entrada de água	
altura de água mínima	
altura de água máxima	

5. VÁLVULAS

válvulas de seccionamento (TCV)
válvula de alívio (PSV) regulada para a altura de entrada de água no reservatório

6. TUBAGENS

ID	Comprimento	Diâmetro	Rugosidade
	(m)	(mm)	(-)
T1200	2.00	200	110
T1300	100.00	200	110
T1500	5310.00	200	110

7. ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

Identificação/localização : Bombas submersíveis das captações de Canas

ID da bomba	Tipo	Curva	Q	H	Pot.	Vel.
			l/s	m c. a.	kW	-
Bfr6	velocidade fixa	CAN_Bac5&Bfr6	20.00	80.00		
Bac5	velocidade fixa	CAN_Bac5&Bfr6	20.00	80.00		
	seleccionar					
	seleccionar					

8. CAPTAÇÕES

Identificação/localização : Captações de Canas

ID da captação	Nível de água	ID da bomba	Conduta de compressão		
	(m)		ID	comp. (m)	D (mm)
RFfr6	183	Bfr6	T1100	85	200
RFac5	183	Bac5	T1000	85	200

9. REGRAS DE OPERAÇÃO

Descrição:

Funcionamento das bombas submersíveis Bfr6 e Bac5 regulado pelo nível no reservatório. O funcionamento operacional refere-se à época normal de consumos.

Níveis de operação dos reservatórios (m):

	Época		
	baixa	média	alta
nível máximo		4.00	
nível mínimo		1.00	
nível inicial de modelação		2.00	

Consigna de caudal:

Máximo contratual	Época (valores-guia da FCV)		
	baixa	média	alta

Controlos:

ÉPOCA BAIXA	
Configuração:	
REGRA	**COMENTÁRIOS**

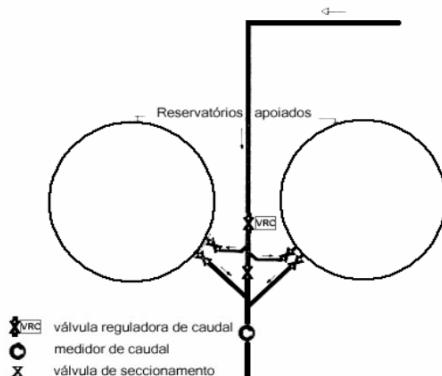
ÉPOCA MÉDIA	
Configuração:	
REGRA	**COMENTÁRIOS**
RULE RValc_Bfr6&Bac5_OPEN IF tank RValc level below 2.5 THEN pump Bfr6 status is OPEN and pump Bac5 status is OPEN	
RULE RValc_Bfr6&Bac5_CLOSED IF tank RValc level above 3.9 THEN pump Bfr6 status is CLOSED and pump Bac5 status is CLOSED	

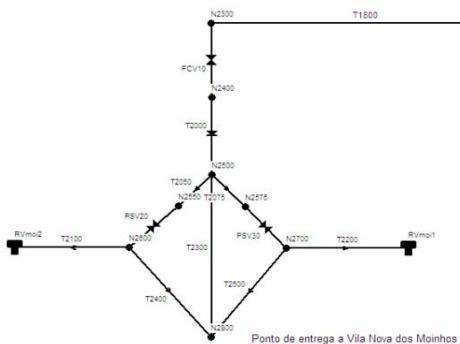
ÉPOCA ALTA	
Configuração:	
REGRA	**COMENTÁRIOS**

10. COMENTÁRIOS

MOINHOS

1. DESCRIÇÃO

Identificação: Ponto de entrega dos Moinhos

Código: MOI

Sector:

Resumo:

O reservatório dos Moinhos constitui um ponto de entrega para esta povoação. Este é composto por duas células com características idênticas e com entrada de caudal acima da superfície livre. A montante do reservatório existe uma válvula reguladora de caudal que se encontra aberta.

2.CONFIGURAÇÃO NO CADASTRO

3.CONFIGURAÇÃO E NOMENCLATURA NO MODELO

Legenda

Dispositivo	ID
reservatórios de nível fixo	não existe
reservatórios de nível variável	RVmoi1, Rvmoi2
bombas	não existe
válvulas de seccionamento	T2300, T2400, T2500
tubagens	não existe
nós com medição	N2800
nós de consumo	N2800
válvulas de retenção	T2000
válvulas de alívio	PSV20, PSV30
válvulas reguladoras de caudal	FCV10
by-pass seccionável (troços)	T2300

4.RESERVATÓRIOS: GEOMETRIA E COTAS

CÉLULA 1 ID RVmoi1	VALOR
tipo	apoiado
tipo de secção transversal	circular
diâmetro (diâmetro equivalente ou curva de volume)	10.00
cota da soleira	230.00
altura de entrada de água	4.50
altura de água mínima	1.00
altura de água máxima	4.00

CÉLULA 2 ID RVmoi2	VALOR
tipo	apoiado
tipo de secção transversal	circular
diâmetro (diâmetro equivalente ou curva de volume)	10.00
cota da soleira	230.00
altura de entrada de água	4.50
altura de água mínima	1.00
altura de água máxima	4.00

5. VÁLVULAS

válvulas de seccionamento (TCV)
válvula de alívio (PSV) regulada para a altura de entrada de água no reservatório
válvula reguladora de caudal (FCV) regulada para a consigna de caudal

6. TUBAGENS

ID	Comprimento	Diâmetro	Rugosidade
	(m)	(mm)	(-)
T1800	1500.00	200	110

7. ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

Identificação/localização:

ID da bomba	Tipo	Curva	Q	H	Pot.	Vel.
			l/s	m c. a.	kW	-
	seleccionar					
	seleccionar					
	seleccionar					
	seleccionar					

8. CAPTAÇÕES

Identificação/localização:

ID da captação	Nível de água	ID da bomba	Conduta de compressão		
	(m)		ID	comp. (m)	D (mm)

9. REGRAS DE OPERAÇÃO

Descrição:

Funcionamento das válvulas PSV20 e PSV30 regulado pelo nível de água nas células do reservatório. O funcionamento operacional refere-se à época normal de consumos.

Níveis de operação dos reservatórios (m):

	Época		
	baixa	média	alta
nível máximo		4.00	
nível mínimo		1.00	
nível inicial de modelação		2.00	

Consigna de caudal:

Máximo contratual	Época (valores-guia da FCV)		
	baixa	média	alta
		11.00	

Controlos:

ÉPOCA BAIXA	
Configuração:	
REGRA	**COMENTÁRIOS**

ÉPOCA MÉDIA	
Configuração:	
REGRA	**COMENTÁRIOS**
RULE RVmoi1_PSV20&PSV30_OPEN IF tank RVmoi1 level below 1.5 THEN valve PSV20 setting is 4.5 and valve PSV30 setting is 4.5	
RULE RVmoi1_PSV20&PSV30_CLOSED IF tank RVmoi1 level above 3.9 THEN valve PSV20 status is CLOSED and valve PSV30 status is CLOSED	

ÉPOCA ALTA	
Configuração:	
REGRA	**COMENTÁRIOS**

10. COMENTÁRIOS

Fichas de rede

Entidade gestora: Seleccionar entidade na folha "Fichas de rede - Intro"

1. Introdução

As fichas de rede permitem coligir informação sobre a forma como foram gerados e carregados no modelo os dados descritivos das propriedades dos nós, das tubagens e das válvulas da rede. Permitem avaliar a qualidade da informação recolhida, nomeadamente das cotas dos nós, dos comprimentos, dos diâmetros e das rugosidades das tubagens e dos diâmetros e do estado das válvulas.

As fichas de rede, tal como as fichas técnicas, constituem parte integrante do manual do modelo. Devem ser preenchidas pela equipa responsável pelo desenvolvimento do modelo e ser complementadas sempre que a equipa considere importante. As fichas de rede devem estar permanentemente actualizadas e devidamente identificadas com a data da última actualização e com a designação do(a) técnico(a) que procedeu ao seu carregamento ou actualização.

A cada modelo corresponde um conjunto de fichas de rede, tal como um conjunto de fichas técnicas.

Nos quadros abaixo, sempre que um campo não seja passível de preenchimento, colocar como observação "não aplicável".

2. Fiabilidade dos dados

Nas fichas de rede adopta-se a seguinte classificação relativamente à fiabilidade dos dados:

A - Muito fiável	Baseados em medições exaustivas, registos fidedignos, procedimentos, investigações ou análises adequadamente documentadas e reconhecidas como o melhor método de cálculo.
B - Fiável	Genericamente como em A, mas com algumas falhas não significativas nos dados, tais como parte da documentação estar em falta, os cálculos serem antigos, ou ter-se confiado em registos não confirmados, ou ainda terem-se incluído alguns dados por extrapolação.
C - Pouco fiável	Baseados em extrapolações a partir de uma amostra limitada para a qual se aplica o grau A ou B.
D - Sem fiabilidade	Baseados em dados transmitidos verbalmente e não confirmados e/ou em inspecções ou análises sem os devidos cuidados.
Observações	As bandas de fiabilidade apresentadas seguem aquelas que se encontram actualmente estabelecidas no Manual sobre Indicadores de Desempenho para Serviços de Abastecimento de Água (Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J.M., Parena, R. (2000). Performance indicators for water supply services. Manual of Best Practice Series, IWA Publishing, London, ISBN 1 900222 27 2)

3. Exactidão dos dados

Exactidão (da medição) é a aproximação entre o resultado da medição e o valor (convencionalmente) verdadeiro da grandeza medida. Deve ser calculada para a medição em si e não para o instrumento de medição. Isto significa, em termos práticos, que se o instrumento de medição tiver uma exactidão muito boa para a gama de medição (conjunto dos valores da grandeza a medir para os quais o erro do instrumento de medição é supostamente mantido entre determinados limite) mas os valores medidos se situarem fora dessa gama, a exactidão da medição é muito menor. O valor da exactidão deve ser preenchido em termos absolutos (p.ex. exactidão das cotas: 1- melhor ou igual que 1,5 m; 2 - fora da banda 1 mas melhor ou igual a 3 m).

Observações	O conceito de exactidão segue aquele que se encontra actualmente estabelecido no Manual sobre Indicadores de Desempenho para Serviços de Abastecimento de Água (Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J.M., Parena, R. (2000). Performance indicators for water supply services. Manual of Best Practice Series, IWA Publishing, London, ISBN 1 900222 27 2)

Ficha de rede	Nós de modelação

Entidade gestora:	Seleccionar entidade na folha "Fichas de rede - Intro"
Actualizado por:	
Data de actualização	

1. Critérios e procedimentos para a criação de nós de modelação

Critérios adoptados	[Critérios que conduziram à criação de nós para modelação no SIG ou no cadastro]
Procedimento para a criação de nós de modelação	[Manualmente ou de forma automática]

2. Via de carregamento utilizada

Propriedade	Informação existente no SIG?	Se foi passada para o modelo, indique a via de carregamento: exportada a partir do SIG ou cadastro	inserida no ficheiro .inp	inserida no ambiente do Epanet
ID do nó *	☐	☐	☐	☐
Coordenada - X *	☐	☐	☐	☐
Coordenada - Y *	☐	☐	☐	☐
Descrição **	☐	☐	☐	☐
Zona **	☐	☐	☐	☐
Cota *	☐	☐	☐	☐

(*) - obrigatório; (**) - opcional

3. Propriedades dos nós

Campo: ID

Descrição da propriedade:	Código de identificação do nó. Este pode ser constituído por um conjunto máximo de 15 caracteres alfanuméricos. Não podem existir dois nós com o mesmo ID.
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No modelo

Regras de codificação adoptadas	[Indicar se foi seguida uma nomenclatura do SIG ou se foi adoptada uma nomenclatura própria para modelação. No caso de ter sido adoptado o sistema de codificação do SIG, indicar qual dos códigos foi utilizado para identicar os nós (p.ex., código do elemento, código patrimonial]

Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Coordenadas X - Y
Descrição da propriedade:	Localização segundo a horizontal e a vertical do nó no mapa, medida em unidades de comprimento do mapa. Se os campos forem deixados em branco, o nó não aparecerá na janela do Mapa da Rede.
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No modelo	
Elementos ou partes do sistema que não foram traçados com as coordenadas reais	[Especificar quais as áreas ou elementos do sistema que não foram desenhados com as coordenadas reais.]
Sistema de projecção cartográfica utilizado	[Indicar o sistema de projecção cartográfica utilizado (p.ex., Hayford-Gauss Militar, Hayford-Gauss Lisboa, Datum 73).]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Descrição
Descrição da propriedade:	Opção de escrita de texto adicional que permite descrever informação relevante sobre o nó.
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde se encontra registada:	SIG e modelo

No modelo	
Informação descrita	[Indicar, caso seja aplicável, o tipo de informação registada neste campo.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Zona
Descrição da propriedade:	Opção de escrita de texto adicional que permite descrever informação relevante sobre o nó (p.ex., sector da rede ou zona de pressão a que pertence).
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde se encontra registada:	SIG e modelo

No modelo	
Informação descrita	[Indicar, caso seja aplicável, o tipo de informação registada neste campo.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados nos campos acima.]

Campo:	Cota
Descrição da propriedade:	Cota do terreno em unidades de comprimento (metros) acima de um determinado referencial comum.
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No SIG	
Origem da informação	[Indicar, as fontes de informação utilizadas para o carregamento das cotas no SIG (p.ex., levantamento topográfico, leitura na cartografia existente).]
Via utilizada para o carregamento da propriedade	[Indicar, caso seja aplicável, a forma como foram carregadas as cotas no SIG (p.ex., por leitura na cartografia, leitura automática das cotas a partir de um layer de cotas, recurso a um modelo digital de terreno).]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Exactidão da informação	[Consultar Exactidão dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar as cotas do terreno, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Ficha de rede	Tubagens

Entidade gestora:	Seleccionar entidade na folha "Fichas de rede - Intro"
Actualizado por:	
Data de actualização	

1. Critérios para a consideração de uma tubagem para modelação

Tubagens consideradas para modelação	[Indicar qual o critério de selecção das tubagens consideradas para modelação.]

2. Via de carregamento utilizada

Propriedade	Informação existente no SIG?	Se foi passada para o modelo, indique a via de carregamento		
		exportada partir do SIG ou cadastro	inserida no ficheiro .inp	inserida no ambiente do Epanet
ID da tubagem *	☐	☐	☐	☐
Nó inicial *	☐	☐	☐	☐
Nó final *	☐	☐	☐	☐
Descrição **	☐	☐	☐	☐
Zona **	☐	☐	☐	☐
Comprimento *	☐	☐	☐	☐
Diâmetro *	☐	☐	☐	☐
Rugosidade *	☐	☐	☐	☐
Coef. de perda de carga singular **	☐	☐	☐	☐
Estado inicial **	☐	☐	☐	☐

(*) - obrigatório; (**) - opcional

3. Propriedades das tubagens

Campo: ID

Descrição da propriedade:	Código de identificação da tubagem. Este pode ser constituído por um conjunto máximo de 15 caracteres alfanuméricos. Não podem existir duas tubagens com o mesmo ID.
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No modelo	
Regras de codificação das tubagens	[Indicar se foi seguida uma nomenclatura do SIG ou se foi adoptada uma nomenclatura própria para modelação. No caso de ter sido adoptado o sistema de codificação do SIG, indicar qual dos códigos foi utilizado para identicar as tubagens (p.ex., código do elemento, código patrimonial]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Descrição
Descrição da propriedade:	Opção de escrita de texto adicional que permite descrever informação relevante sobre a tubagem.
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde se encontra registada:	SIG e modelo

No modelo	
Informação descrita	[Indicar, caso seja aplicável, o tipo de informação registada neste campo.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Zona
Descrição da propriedade:	Opção de escrita de texto adicional que permite descrever informação relevante sobre a tubagem (p.ex., sector da rede ou zona de pressão a que pertence).
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde se encontra registada:	SIG e modelo

No modelo	
Informação descrita	[Indicar, caso seja aplicável, o tipo de informação registada neste campo.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Comprimento
Descrição da propriedade:	Comprimento real da tubagem em unidades de comprimento (metros).
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No SIG	
Origem da informação	[Indicar as fontes de informação utilizadas para o carregamento dos comprimentos no SIG (p.ex., cálculo automático de comprimentos, inserção manual a partir do cadastro em papel).]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar o comprimento da conduta, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Diâmetro
Descrição da propriedade:	Diâmetro interno da tubagem em unidades de comprimento (milímetros).
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No SIG	
Origem da informação	[Indicar as fontes de informação utilizadas para o carregamento dos diâmetros no SIG.]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Incrustação de tubagens	[Indicar, caso seja aplicável, a existência de tubagens com incrustações, assim como o respectivo grau de incrustação - elevado, médio ou baixo.]

Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar o diâmetro da conduta, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo: Rugosidade

Descrição da propriedade:	Coeficiente da fórmula de perda de carga na tubagem que depende naturalmente do tipo de fórmula adoptada (fórmula de Hazen-Williams, de Chezy-Manning ou de Darcy-Weisbach).
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No SIG	
Origem da informação relativa ao estado, idade e material das condutas	[Indicar, as fontes de informação utilizadas para o carregamento das rugosidades no SIG - o que implica o levantamento de informação sobre o estado, a idade e o tipo de material.]
Via utilizada para o carregamento da propriedade	[Indicar, caso seja aplicável, a forma como foram carregadas as rugosidades no SIG (p.ex., tabela que relaciona o tipo de material com a rugosidade).]
Fiabilidade da informação relativa ao estado	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Fiabilidade da informação relativa à idade	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Fiabilidade da informação relativa ao tipo de material	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar o estado, a idade e o material das tubagens, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	**Coef. de perda de carga singular**
Descrição da propriedade:	Coeficiente de perda de carga singular adimensional associado a curvas, alargamentos, estreitamentos, etc. É assumido o valor zero se o campo for deixado em branco.
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No SIG	
Origem da informação	[Indicar, as fontes de informação utilizadas para o carregamento de singularidades no SIG.]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar singularidades das tubagens, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	**Estado inicial**
Descrição da propriedade:	Esta propriedade permite o isolamento de um troço, sem ser necessário modelar as respectivas válvulas de seccionamento, ou fixar o sentido do escoamento sem ser necessário modelar a válvula de retenção. Assim, esta propriedade determina se a tubagem está inicialmente aberta, fechada ou se possui uma válvula de retenção. Se for especificado que possui uma válvula de retenção, o sentido do escoamento na tubagem é fixado, processando-se sempre do nó inicial para o nó final e o estado da tubagem não pode ser alterado utilizando a opção de Controlos. Se for associado à tubagem o estado ABERTO / FECHADO, este pode ser alterado utilizando a opção de Controlos.
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No SIG	
Origem da informação	[Indicar, as fontes de informação utilizadas para o carregamento do estado da tubagem no SIG.]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]

Ficha de rede	Válvulas

Entidade gestora:	Seleccionar entidade na folha "Fichas de rede - Intro"
Actualizado por:	
Data de actualização	

1. Critérios para a consideração de uma válvula de seccionamento para modelação

Descrever apenas as válvulas de seccionamento individualizadas na modelação.
Esta secção não se aplica a válvulas de manobra ou de controlo (p.ex., válvula reguladora de caudal, válvula redutora de pressão, válvula de alívio), devendo estas ser especificadas nas fichas técnicas.
A modelação das válvulas seccionamento é opcional, uma vez que o seccionamento de uma tubagem pode ser efectuado configurando a propriedade Estado Inicial de uma tubagem para Fechado (ver folha de cálculo "Troços (infra-estrutura)"). As válvulas de seccionamento são modeladas no Epanet como uma válvula de borboleta (Throttle Control Valve - TCV), cujo o valor do Parâmetro de controlo na válvula corresponde a um coeficiente de perda de carga singular.

Válvulas consideradas para modelação	 [Descrever as opções consideradas para a modelação de válvulas de seccionamento.]

2. Via de carregamento utilizada

Propriedade	Informação existente no SIG?	Se foi passada para o modelo, indique a via de carregamento: exportada partir do SIG ou cadastro	inserida no ficheiro .inp	inserida no ambiente do Epanet
ID da válvula *	☐	☐	☐	☐
Nó inicial *	☐	☐	☐	☐
Nó final *	☐	☐	☐	☐
Descrição **	☐	☐	☐	☐
Zona **	☐	☐	☐	☐
Diâmetro *	☐	☐	☐	☐
Tipo *	☐	☐	☐	☐
Parâmetro de controlo na válvula *	☐	☐	☐	☐
Coeficiente perda de carga singular **	☐	☐	☐	☐
Estado fixo **	☐	☐	☐	☐

(*) - obrigatório; (**) - opcional

3. Propriedades das válvulas

Campo:	ID
Descrição da propriedade:	Código de identificação da válvula. Este pode ser constituído por um conjunto máximo de 15 caracteres alfanuméricos. Não podem existir duas válvulas com o mesmo ID.
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No modelo	
Regras de codificação das tubagens	[Indicar se foi seguida uma nomenclatura do SIG ou se foi adoptada uma nomenclatura própria para modelação. No caso de ter sido adoptado o sistema de codificação do SIG, indicar qual dos códigos foi utilizado para identicar as válvulas (p.ex., código do elemento, código patrimonial).]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Descrição
Descrição da propriedade:	Opção de escrita de texto adicional que permite descrever informação relevante sobre a válvula.
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde se encontra registada:	SIG e modelo

No modelo	
Informação descrita	[Indicar, caso seja aplicável, o tipo de informação registada neste campo.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Zona
Descrição da propriedade:	Opção de escrita de texto adicional que permite descrever informação relevante sobre a válvula (p.ex., sector da rede ou zona de pressão a que pertence).
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde se encontra registada:	SIG e modelo

No modelo	
Informação descrita	[Indicar, caso seja aplicável, o tipo de informação registada neste campo.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo: Diâmetro

Descrição da propriedade:	Diâmetro interno da válvula em unidades de comprimento (milímetros).
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

No SIG	
Origem da informação	[Indicar, as fontes de informação utilizadas para o carregamento dos diâmetros no SIG.]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar o diâmetro das válvulas, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo: Tipo

Descrição da propriedade:	Tipo de válvula - válvula de borboleta (TCV)
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

SIG	
Origem da informação	[Indicar, as fontes de informação utilizadas para o carregamento do tipo de válvula no SIG.]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar o tipo de válvula, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo: Parâmetro de controlo na válvula

Descrição da propriedade:	Parâmetro necessário para descrever as condições de operação da válvula de borboleta - coeficiente de perda de carga singular (adimensional). Coloque 0 no caso da válvula funcionar apenas como aberta ou fechada.
Tipo de propriedade no modelo:	Obrigatória
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

SIG	
Origem da informação	[Indicar, as fontes de informação utilizadas para o carregamento do valor do parâmetro de controlo na válvula no SIG.]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar o valor do parâmetro de controlo na válvulas, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Coeficiente de perda de carga singular
Descrição da propriedade:	Coeficiente de perda de carga singular adimensional que é aplicável quando a válvula está completamente aberta. É assumido o valor zero se o campo for deixado em branco.
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

SIG	
Origem da informação	[Indicar, as fontes de informação utilizadas para o carregamento do coeficiente de perda de carga na válvula no SIG.]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar o valor do coeficiente de perda de carga na válvula, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Campo:	Estado fixo
Descrição da propriedade:	Estado da válvula no início da simulação. Se for fixada a opção ABERTO ou FECHADO, a propriedade parâmetro de controlo na válvula é ignorada e esta comporta-se como um troço aberto ou fechado, respectivamente. Se for fixada a opção NENHUM, a válvula comporta-se como planeado. O estado fixo da válvula e o parâmetro de controlo na válvula podem ser variáveis ao longo da simulação utilizando instruções de controlo. Se o estado da válvula tiver sido fixado ABERTO/FECHADO, o parâmetro de controlo na válvula pode ser activado novamente utilizando controlos operacionais.
Tipo de propriedade no modelo:	Opcional
Sistema de informação onde deve estar registado:	SIG e modelo

SIG	
Origem da informação	[Indicar, as fontes de informação utilizadas para o carregamento do estado da válvula no SIG.]
Fiabilidade da informação	Seleccionar opção [Consultar Fiabilidade dos dados na folha de cálculo "Fichas de rede - Intro" do ficheiro.]
Meios de verificação utilizados	[Descrever os meios utilizados ou a implementar para confirmar o estado da válvula, caso seja necessário.]
Observações	[Indicar outros aspectos não contemplados no(s) campo(s) acima.]

Ficha de calibração

Entidade gestora: Seleccionar entidade na folha "Fichas de rede - Intro"

1. Introdução

As fichas de calibração permitem sintetizar a informação relativa ao parâmetro monitorizado aquando de uma campanha de calibração. As fichas de calibração, tal como as fichas de rede e as fichas técnicas, constituem parte integrante do manual do modelo. Estas devem ser preenchidas devidamente para cada campanha de calibração.

A cada modelo corresponde um conjunto de fichas de calibração, fichas de consumo, fichas de rede e de fichas técnicas.

Um ficheiro de calibração é um ficheiro de texto que contém dados de medições obtidos para um parâmetro particular, durante um determinado período de tempo no sistema de distribuição. O ficheiro fornece dados observados que podem ser comparados com os resultados de uma simulação da rede. Devem ser criados ficheiros separados para diferentes parâmetros (p.ex., pressão, cloro, caudal, etc.) e diferentes séries de amostragens. Cada linha do ficheiro contém a seguinte informação:

- ID da Localização - Rótulo de ID (tal como definido no modelo da rede) da localização onde a medição foi efectuada
- Tempo - Instante (em horas) em que a medição foi efectuada
- Valor - Resultado da medição

O instante de medição deve atender ao instante inicial da simulação, ao qual o Ficheiro de Calibração será aplicado. Este pode ser

```
;Medições do Traçador de Flúor
;Local     Tempo   Valor
;-------------------------
 N1        0       0.5
           6.4     1.2
           12.7    0.9
 N2        0.5     0.72
           5.6     0.77
```

Parâmetro de calibração	Pressão

Entidade gestora:	Seleccionar entidade na folha "Fichas de rede - Intro"
Sistema	
Data da campanha (aaaa-mm-dd)	

1. Preparação da campanha

Equipa envolvida	[Indicar a equipa envolvida na equipa de trabalho.]
Sincronismo das medições	[Indicar o procedimento adoptado para obter medições síncronas entre os equipamentos de campo e os equipamentos fixos, incluindo os que se encontram integrados no sistema de telegestão.]
Calibração/ Aferição dos manómetros	[Indicar o procedimento adoptado para calibrar/ aferir os manómetros.]

2. Funcionamento operacional e parâmetros a registar

Funcionamento operacional da rede	[Registe o estado ou os parâmetros de controlo dos diferentes equipamentos instalados na rede que sejam relevantes para o respectivo funcionamento operacional (p.ex., estado/parâmetro de regulação das válvulas; funcionamento de bombas]
Parâmetros a registar	[A partir dos medidores instalados na rede ou do sistema de telegestão, indique os parâmetros a serem monitorizados durante a campanha de calibração (p.ex., caudais de entrada e de saída da rede, variação de nível nos reservatórios ou a jusante de bombas]

3. Ajustes ao modelo/rede em função dos resultados do processo de calibração

Ajustes ao modelo decorrentes do processo de calibração	[Após a realização desta campanha de calibração, indique os ajustes efectuados ao modelo.]
Ajustes ao funcionamento operacional da rede decorrentes do processo de calibração	[Após a realização desta campanha de calibração, indique os ajustes efectuados ao funcionamento operacional da rede.]

4. Pontos de calibração

Todos os campos abaixo que não sejam referentes aos dados de calibração - Campos de Nome, Tempo e pressão, devem ser iniciados com **(;)**.

;

;Localização do ponto de calibração	
;ID do nó no modelo	
;Altura acima do terreno do ponto de	
;Cota de terreno verificada?	
;Identificação do manómetro	
;Observação	

;

;NOME	HH:MM	Pressão (m)
27000	10:22	66.5
	10:27	67.8
	10:32	67.8
	10:37	67
	10:42	66.8
	10:47	67.8
	10:52	66.5
	10:57	66.5
	11:02	66.5
	11:07	66.8
	11:12	66
	11:17	67.5
	11:22	67.5
	11:27	67.5
	11:32	67.5
	11:37	68.5